



lubrication management

IK4-TEKNIKER

Contaje de partículas

Manuel Bilbao, Adolfo Málaga

1. TEORIA

1.1. Introducción

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 contaje de partículas consiste en la medida de la contaminación sólida en el seno de un lubricante mediante el contaje del número de partículas y clasificación del grado de contaminación en función del tamaño/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.

Este ensayo estaba sólo recomendado para “sistemas hidráulicos u otros sistemas limpios como turbinas”, en los cuales los niveles de desgaste eran bajos. Si bien actualmente se está extendiendo a cualquier sistema lubricado, dada la gran correlación existente entre la contaminación por partículas y el fallo de los sistemas.

Existen diversas normas internacionales utilizadas para clasificar un fluido en función de la cantidad de contaminantes sólidos que posee en suspensión. La mayoría de estas clasifican el grado de limpieza del fluido según las cantidades de contaminantes existentes teniendo en cuenta unos tamaños determinados.

1.2. Equipos de ensayo

Existen multitud de tipos de contadores de partículas. Desde los manuales a los automáticos, pasando por los ópticos y por los de bloqueo de poro entre otros. Aquí se va a hablar de los automáticos.

a) Contadores ópticos

1. Contadores ópticos automáticos por bloqueo de la luz blanca

En este tipo de contadores, las partículas pasan a través de la celda de detección y crea una sombra sobre el fotodetector. La caída en el voltaje producido en el fotodetector es directamente proporcional al tamaño de la sombra y por lo tanto el tamaño de la partícula que pasa a través.

El principio de funcionamiento consiste en proyectar un rayo de luz a través de la muestra. Si se encuentran partículas en el seno del fluido bloquearán la luz, lo cual hará caer la energía medida que es más o menos proporcional al tamaño de la partícula.

2. Contadores ópticos automáticos por dispersión de luz

En los equipos láser, debido a la naturaleza prácticamente paralela del haz láser, la dispersión de la luz es mínima hasta que no pasa una partícula por el haz. Cuando el haz golpea la partícula se genera una dispersión de la luz que alcanza el fotodetector. El cambio en el voltaje observado es directamente proporcional al tamaño de la partícula. Normalmente los detectores láser son más exactos y sensibles que los de luz blanca.

Este es un tipo de contador de partículas más moderno. Como en los de bloqueo de luz, las partículas provocan una interferencia medible en la transmisión de la luz a través de la célula. Sin embargo, además de utilizar la luz blanca, este método utiliza un láser. La luz altamente enfocada emitida es interrumpida por una partícula, produciendo un efecto de dispersión. El aumento de la energía a través del área de muestra se mide con este tipo de contador, justo lo contrario que con el método de bloqueo de luz.

Una muestra de aceite puede contener en su seno multitud de compuestos, los cuales pueden interferir la medida y dimensionamiento de las partículas sólidas presentes. El problema más común es la entrada de burbujas de aire y gotas de agua, las cuales dispersan y bloquean la luz, proporcionando lecturas erróneas en los contadores ópticos automáticos. Este método no es aplicable para las emulsiones de aceite y agua. Si no se realiza cierta preparación de muestra, un contador óptico no trabaja bien con fluidos oscuros o contaminados con una alta carga de sedimentos o carbonilla. Esto puede dar lugar a errores de medida, o bloquear totalmente el paso de luz.

Se deben matizar una serie de cuestiones sobre los contadores ópticos automáticos. Las partículas provenientes de un aceite no son casi nunca esféricas. Esto puede crear una serie de problemas en el contador óptico a la hora de clasificar partículas con unas dimensiones x e y muy diferentes. Para resolver este problema se ha definido el diámetro esférico equivalente.

Mediante este método se mide la sombra de la partícula o el efecto de dispersión que produce y la asemeja a una esfera perfecta.

Otro concepto es el del falso positivo, por ejemplo burbujas de aire, agua libre o emulsionada, aditivos floculados, etc. Éstos se tienen en cuenta como si fuesen otra partícula más.

Como ejemplos de contadores de partículas que utilizan estos métodos se pueden destacar los siguientes:

- Eaton
- Emerson Process Management CSI-52PC
- Emerson Process Management CSI-5200C
- HIAC-PODS
- Hydac Technology-FCU 2000-4

- Internormen-Filter-CCS2
- MP Filtri USA-LPA2
- Pall Corp. PFC400W
- Pall Corp. PIM400
- Pamas GmbH-S-2
- Pamas GmbH-SBSS
- Pamas GmbH-S-40
- Pamas GmbH-OLS
- Pamas GmbH-OLMS
- Pamas GmbH-SVSS
- PDK-PALS
- Stauff Corp.-LasPaCl
- Webtec Products-DLPC

b) Contadores por bloqueo de poro

Una alternativa a los contadores ópticos por bloqueo o dispersión de la luz son los de bloqueo de poro. El principio básico es similar a los ópticos, lo que se quiere conseguir es que solo se midan las partículas sólidas. La presencia de aire y/o agua en el fluido no afecta a la exactitud de los contadores de partículas por bloqueo de poro, tampoco influye el color u opacidad de la muestra. Sin embargo, estos equipos deben estimar la distribución de tamaños de las partículas por extrapolación, no miden exactamente la concentración de sólidos por encima de un tamaño de poro determinado. Para ciertos líquidos oscuros como aceites de motor diesel o altamente contaminados, los equipos por bloqueo de poro ofrecen muchas ventajas sobre los ópticos.

En este método se hace pasar un volumen de muestra a través de una malla con tamaño de poro claramente definido, normalmente 10 μm . Existen dos equipos que usan este método:

- El primero de ellos mide la caída de flujo a lo largo de la membrana hasta que se colmata mientras se mantiene una presión constante, primero con partículas mayores de 10 μm , y después con las partículas menores, cuando las grandes ya han colmatado la pantalla.
- El segundo mide el aumento de la presión diferencial a lo largo de la membrana mientras que el flujo se mantiene constante cuando la membrana se colmata de partículas.

Ambos equipos poseen un algoritmo que transforma la caída del flujo en el tiempo o el aumento de la presión en un grado ISO de acuerdo, entre otras, con la ISO 4406:99.

Aunque estos equipos no tienen los problemas de los falsos positivos que poseen los equipos ópticos, no poseen el mismo rango dinámico que los ópticos, además estiman la distribución de partículas de una manera aproximada, y dependen de la exactitud del algoritmo utilizado.

Como ejemplos de contadores de partículas que utilizan estos métodos se pueden destacar los siguientes:

- Desing Maintenance System Inc.-VIP
 - PALL Corp. PCM400
 - Rockwell Automation/Entek-Contam-Alert
- c) Contadores por análisis de imagen

Esta técnica aborda de diferente manera el conteo de partículas. La muestra pasa a través del área de ensayo y se fotografía digitalmente. Se mide el área superficial de la partícula en dos dimensiones, y a continuación se graba para su posterior medida en el conteo. A la vez que se cuentan las partículas se evalúan sus formas, mecanismo de desgaste por el cual han sido generadas, etc. La morfología de la partícula permite al equipo excluir a las burbujas de aire o agua al ser completamente redondas. Así que, además de eliminar del conteo las partículas de aire y las de agua permite conocer la morfología y mecanismo de desgaste.

Como ejemplos de contadores de partículas que utilizan estos métodos se puede destacar el siguiente:

- Spectro Inc.-Lasernet FINES-C

Los contadores de partículas ópticos estiman el tamaño de cada partícula basándose en la energía de la luz que pasa a través del área del flujo de muestra por el instrumento. Una gran pérdida de energía, en el caso de los contadores de partículas por bloqueo de luz, o un pico de energía si es un contador de partículas por dispersión de luz, sugiere una partícula proporcionalmente grande. Se pueden dar errores debido a la orientación de la partícula y otra serie de factores, el método óptico es generalmente más efectivo a la hora de estimar el tamaño individual de cada partícula. Los contadores por bloqueo de poro no cuentan las partículas individualmente, sino que miden un colectivo de la totalidad de la población de partículas que pasan a través de la pantalla.

1.3. Códigos de niveles de limpieza

A la hora de detectar o corregir problemas se debe utilizar una escala de referencia de la contaminación presente en el sistema. Las escalas más utilizadas son ISO 4006 y NAS 1638, aunque existen otros métodos como el MIL-STD 1246C, NAVAIR 01-1 o CHA(RN) entre otros.

a) ISO 4406:1987 e ISO 4406:1999

En la versión ISO 4406 de 1987 el resultado se expresa mediante un código compuesto por dos dígitos. El primero corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 5 micras por mililitro de fluido, mientras que el segundo corresponde al número total de partículas superiores a 15 micras por mililitro de fluido. También se ha expresado con un código de tres dígitos en el cual el primero corresponde al número total de partículas superiores a 2 micras por mililitro de fluido.

En la versión ISO 4406 de 1999 el resultado se expresa mediante un código compuesto por tres dígitos. El primero corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 4 micras por mililitro de fluido. El segundo corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 6 micras por mililitro de fluido. El tercero corresponde al número total de partículas superiores a 14 micras por mililitro de fluido.

Las partículas de >4 y >6 micras son indicativas de la tendencia a la formación de depósitos de partículas, mientras que las >14 micras indican la cantidad de partículas grandes presentes, las cuales contribuyen en gran medida a un posible fallo catastrófico de un componente.

ISO 4402 Anterior Tamaño de Partículas (μm)	1	2	5	7	10	12	15	20	30	50
ISO 4406 (1987)		R₂/	R₅/				R₁₅/			
Nuevo ISO 11171 Tamaño de Partículas (μm)	4.2	4.6	6.4	7.7	9.8	11.3	13.6	17.5	24.9	38.2
ISO 4406 (1999)	R₄/		R₆/				R₁₄/			

Tabla 1. Diferencia entre las normas ISO 4406 (1987) y ISO 4406 (1999).

Este cambio en los códigos de contaminación por partículas sólidas ISO ha llevado a la variación normalmente en el primer dígito en el resultado. Por ejemplo, un resultado ISO 14/12/10 con el código antiguo R₂/R₅/R₁₅ pasa a ISO 15/12/10 con el código nuevo R₄/R₆/R₁₄.

Rango de Número	Número de partículas/ml	
	Más de	Hasta e incluido
24	80000	160000
23	40000	80000
22	20000	40000

21	10000	20000
20	5000	10000
19	2500	5000
18	1300	2500
17	640	1300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	0.64	1.3
6	0.32	0.64

Tabla 2. Grados de limpieza ISO 4406

La razón por la que se ha cambiado el tamaño de las partículas de la clasificación no ha sido otra que el debido al cambio en el material de calibración. En la tabla 2 se muestra un resumen de las diferentes normas utilizadas antes y ahora con la nueva norma ISO 4406:1999.

Aplicación	Antigua	Nueva
Método de calibración de los contadores de partículas automáticos para líquidos	ISO 4402	ISO 11171
Método de codificación del grado de contaminación por partículas sólidas	ISO 4406:1987	ISO 4406:1999
Material de calibración	ACFTD	ISO MTD

Tabla 3. Métodos ISO antiguos y nuevos para la calibración y codificación

En la tabla siguiente se muestra la diferencia en la medida observada del método ISO nuevo frente al antiguo.

Tamaño de partículas (μm)	Calibración anterior de contaje de partículas (ISO 4402)	Calibración nueva de contaje de partículas (ISO 11171)	Relación de conteo
2	4170	24900	x 6
5	1870	3400	x 2
15	179	105	x 0.6
25	40	14	x 0.3

Tabla 4. Cambios en la calibración de los contadores de partícula

Este cambio se debe a:

- El nuevo patrón ISO MTD ayuda a corregir la inexactitud de ACFTD en la antigua calibración.

- El tamaño de las partículas antiguamente solo se medían en dos dimensiones, mientras que ahora se hace en tres.

b) NAS 1638

El código NAS 1638 se creó originalmente para componentes hidráulicos de la industria aeronáutica. El concepto del código está basado en la distribución de tamaños de partículas de una concentración sobre un rango de tamaños de >5 hasta >100 μm . A partir de los datos obtenidos de grados de limpieza en aviación se crearon 14 clases en función del grado de suciedad o limpieza. Cada vez que se aumenta un grado de suciedad la cantidad de partículas se duplica.

Clase	Cantidad máxima de partículas/100 ml en cada rango de tamaño específico (μm)				
	5-15	15-25	25-50	50-100	>100
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1000	178	32	6	1
3	2000	356	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16000	2850	506	90	16
7	32000	5700	1012	189	32
8	34000	11400	2025	360	34
9	128000	22800	4050	720	128
10	256000	45600	8100	1440	256
11	512000	91200	16200	2880	512
12	1024000	182400	32400	5760	1024

Tabla 5. Grados de limpieza NAS 1638/AS 4059

Al igual que ocurría con el código ISO, los nuevos patrones de calibración han provocado la definición de este nuevo código denominado AS 4059 en sustitución del NAS 1638.

	Tamaño de Partículas					
	>4	>6	>14	>21	>38	>70
ISO 1171-Tamaño μm	>4	>6	>14	>21	>38	>70
ISO 4402-Tamaño μm	>1	>5	>15	>25	>50	>100

Tabla 6. Tamaños de partículas medidos en relación con el método de calibración utilizado

Clase	Cantidad máxima de partículas/100 ml en cada rango de tamaño específico (μm)				
	>1	>5	>15	>25	>50
ISO 4402	>1	>5	>15	>25	>50
ISO 11171	>4	>6	>14	>21	>38
Código de Tamaño	A	B	C	D	E
000	195	76	14	3	1
00	390	152	27	5	1
0	780	304	54	10	2
1	1560	609	109	20	4
2	3120	1220	217	39	7
3	6520	2430	432	76	13
4	12500	4860	864	152	26
5	25000	9730	1730	306	53
6	50000	19500	3460	612	106
7	100000	38900	6920	1220	212
8	200000	77900	13900	2450	424
9	400000	156000	27700	4900	848
10	800000	311000	55400	9800	1700
11	1600000	623000	110000	19600	3390
12	3200000	1250000	222000	39200	6780

Tabla 7. Grados de limpieza AS 4059, a) ISO 4402-Tamaño de partículas basado en la dimensión mayor, b) ISO 11171-Tamaño de partículas basado en la proyección del área del diámetro equivalente mayor.

En la siguiente tabla se hace una comparación entre los Grados de limpieza ISO 4406 y NAS 1638

Código ISO	Partículas/mililitro			NAS 1638
	$\geq 2 \mu$	$\geq 5 \mu$	$\geq 15 \mu$	
23/21/18	80000	20000	2500	12
22/20/18	40000	10000	2500	-
22/20/17	40000	10000	1300	11
22/20/16	40000	10000	640	-
21/19/16	20000	5000	640	10
20/18/15	10000	2500	320	9
19/17/14	5000	1300	160	8
18/16/13	2500	640	80	7
17/15/12	1300	320	40	6
16/14/12	640	160	40	-
16/14/11	640	160	20	5
15/13/10	320	80	10	4
14/12/9	160	40	5	3
13/11/8	80	20	2.5	2
12/10/8	40	10	2.5	-
12/10/7	40	10	1.3	1
12/10/6	40	10	0.64	-

Tabla 8. Comparación Grados de limpieza ISO 4406 y NAS 1638.

1.4. 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 certificado de grado de limpieza específico. 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 las muestras.

1.5. Aplicaciones de los contadores de partículas

La medida del grado de limpieza o de contaminación que pueda poseer un lubricante puede ayudar a saber el estado tanto de la máquina como del propio lubricante.

- Permite el análisis del aceite en el laboratorio “on-condition”
- Confirma el mantenimiento correctivo
- Identifica malas reparaciones de máquinas
- Verifica el funcionamiento de la bomba
- Verifica el funcionamiento de la centrífuga
- Confirma el flushing del sistema
- Confirma la necesidad de un análisis ferrográfico
- Realiza un seguimiento del desgaste de la máquina
- Identifica un desgaste de engranajes anormal
- Identifica la presencia de desgaste abrasivo
- Detecta un desgaste corrosivo elevado
- Verifica el estado de los cojinetes
- Identifica el exceso de gases de cárter en el motor
- Identifica presencia de contaminantes atmosféricos
- Verifica el grado de limpieza del lubricante almacenado y/o confirma el grado de limpieza deseado
- Verifica el funcionamiento del filtro
- Determina el tiempo de uso de los filtros
- Determina el punto adecuado de cambio de filtros
- Identifica defectos en filtros nuevos
- Verifica la idoneidad de selección del filtro

- Reconoce el estado de los filtro by-pass.

2. INTERPRETACIÓN DEL VALOR DEL CONTAJE DE PARTICULAS

2.1. Interpretación de los resultados

El Código ISO 4406-99 mostrará un valor alto si el contenido de partículas es elevado y será muy bajo si el aceite está limpio.

Algunos fabricantes de maquinaria proponen especificaciones de código ISO, otros los exigen para validar las garantías. 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 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.

2.2. Grados de limpieza necesarios para diferentes máquinas

Muchos de los fabricantes de equipos hidráulicos y de cojinetes especifican el grado óptimo de nivel de limpieza requerido para sus componentes. Los componentes que trabajan con un fluido con alto grado de suciedad acortan su vida.

En la tabla 9 se indican a *modo orientativo* los grados de limpieza recomendados para diferentes componentes. Esta información es útil a la hora de seleccionar el grado de limpieza deseado.

Componente	Código ISO
Válvulas de Servo-control	16/14/11
Rodamiento	16/14/12
Válvulas Proporcionales	17/15/12
Cojinetes	17/15/12
Reductoras Industriales	17/15/12
Reductoras Móviles	17/16/13
Motor diesel	17/16/13
Turbina vapor	18/15/12
Bombas/Motores de pistón y paletas	18/16/13
Válvulas de control de presión y direccional	18/16/13
Máquina de papel	19/16/13
Motores/Bombas de engranajes	19/17/14
Válvulas de control de flujo, cilindros	20/18/15
Fluidos nuevos sin usar	20/18/15

Tabla 9. Limpieza de los fluidos necesarios para componentes lubricados típicos

Código ISO	----	12/9	----	14/11	----	16/13	----	18/15	----	20/17	----	22/19	----	24/21	----	26/23
Fluidos Hidráulicos	Muy limpio			Limpio						Sucio						
Cajas de cambios				Muy limpio				Limpio								Sucio
Motores			Muy limpio					Limpio				Sucio				
Turbinas		Muy limpio				Limpio		Sucio								

Tabla 10. Estado del fluido en función del código ISO