Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Estudio de la degradación de grasa de Litio en función del tiempo de operación en robots industriales

Study of lithium grease degradation as a function of operating time in industrial robots

Rodríguez-Tristán, J.[1], Marín-Martínez, J.[1], Ángel-Monroy, M.[2], Pérez-Bustamante, R.[3], Cáceres-Díaz, L.[4]*

[1] Posgrado, CIATEQ A.C. Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P.
[2] CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada. Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P.
[3] CONAHCyT, InnovaBienestar de México S.A.P.I. de C.V., Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395, S.L.P.
[4] CONAHCyT, CIATEQ A.C. Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P.
emmanuel.tristan@hotmail.com; jose.marin@ciateq.edu.mx; mayra.delangel@ciateq.mx; raul.perez@ciateq.mx; luis.caceres@ciateq.mx*

Innovación tecnológica: Estudio de degradación de lubricantes.

Área de aplicación industrial: Sistemas de manufactura.

Recibido: 16 junio 2023
Aceptado: 09 noviembre 2023

Abstract

The proper usage of lubricating greases is essential in industrial robots of modern manufacturing. However, their prolonged use results in failures due to oxidation and degradation of materials. Oxidation is the most predominant reaction in a lubricant in service and is a common cause of the formation of color bodies, causing gradual darkening of the oil. In this work, the effects of operating time in bearings of an industrial robot on the physical, chemical, thermal and structural characteristics of lithium greases from 0 to 15000 h are evaluated. When studying the properties of the materials using optical microscopy, DSC analysis, TGA and FTIR spectroscopy in unused samples and with intermediate and long service times, it was observed that during the first 12000 h no solid inclusions were found in the samples, but from that time on, metal particles were identified that can be attributed to bearing detachments. The behavior of the particles as a function of time was fitted to a second-order polynomial model with a correlation coefficient R2=0.965 and the contamination rate in the grease for 14,000 h was estimated at 0.3 particles/kg/h. The Sol→Liq and Liq→Sol phase transitions in heating and cooling cycles, the rate of decomposition and weight loss of fat were observed. The aliphatic and carboxyl functional groups attributed to molybdenum

additives were identified. Operating time generated changes in the level of oxidation, color and contamination by metallic particles and dust in the greases, but did not show effects on the chemical, thermal and structural characteristics of the lubricant. These results suggest that lithium-based lubricating greases used in bearings and in industrial robots for production processes are not affected in their structure, vibrational modes, or decomposition kinetics at the operating times evaluated.

Keywords: Grease, Lubrication, Oxidation, Bearings.

Resumen

El uso adecuado de las grasas lubricantes es fundamental en los robots industriales de la manufactura moderna. Sin embargo, su prolongado uso resulta en fallas por oxidación y degradación de los materiales. La oxidación es la reacción más predominante en un lubricante en servicio y es una causa común de la formación de cuerpos de color, ocasionando oscurecimiento gradual del aceite. En este trabajo, se evalúan los efectos del tiempo de operación en rodamientos de un robot industrial sobre las características físicas, químicas, térmicas y estructurales de grasas de litio desde 0 hasta 15000 h. Al estudiar las propiedades de los materiales empleando microscopía óptica, análisis de DSC, TGA y espectroscopía FTIR en muestras sin usar y con tiempos intermedios y prolongados de servicio, se observó que durante las primeras 12000 h no se encontraron inclusiones sólidas en las muestras, pero a partir de ese tiempo se identificaron partículas metálicas que pueden ser atribuidas a desprendimientos del rodamiento. El comportamiento de las partículas en función del tiempo se ajustó a un modelo polinomial de segundo orden con coeficiente de correlación R^2=0.965 y se estimó la tasa de contaminación en la grasa para 14000 h en 0.3 partículas/kg/h. Se observaron las transiciones de fase Sol→Liq y Liq→Sol en ciclos de calentamiento y enfriamiento, la tasa de descomposición y pérdida de peso de la grasa. Se identificaron los grupos funcionales alifáticos y carboxilos atribuidos a aditivos de molibdeno. El tiempo de operación generó cambios en el nivel de oxidación, color y contaminación por partículas metálicas y polvo en las grasas, pero no mostró efectos sobre las características químicas, térmicas y estructurales del lubricante. Estos resultados sugieren que las grasas lubricantes base litio empleadas en rodamientos y en robots industriales para procesos de producción no se ven afectadas en su estructura, modos vibracionales, ni cinéticas de descomposición en los tiempos de operación evaluados.

Palabras clave: Grasa, Lubricación, Oxidación, Rodamientos.

1. Introducción

En la actualidad, el uso de robots industriales para manipular herramientas y piezas en procesos de producción es una práctica muy común y necesaria ya que incrementa la eficiencia y productividad, reduce costos, mejora la calidad, entre otras ventajas [1]. El monitoreo del estado de salud de la maquinaria rotativa es una tarea crucial para garantizar la confiabilidad en los procesos industriales. En particular, los rodamientos son componentes mecánicos utilizados en la mayoría de los dispositivos giratorios y representan la principal fuente de fallas en dichos equipos; motivo por el cual se han incrementado las actividades de investigación para detectar y diagnosticar sus fallos [2]. Los rodamientos se encuentran en constante

fricción y tensión durante la operación, por lo que presentan modos de falla de desgaste asociados con la entrada de impurezas, oxidación, corrosión eléctrica, deslizamiento por movimiento irregular y lubricación deficiente, siendo esta última la contribución más determinante para la falla. La duración y correcto funcionamiento de los robots depende en gran parte del tipo de lubricante suministrado y la frecuencia de mantenimiento. En la industria, se emplean varios métodos para monitorear lubricantes, incluidas mediciones de concentración de partículas, análisis de ruido, monitoreo de corriente eléctrica y análisis de señales de vibración [3]. Los lubricantes más habituales son grasas compuestas por aceites sintéticos y minerales, aditivos y espesantes, y en los sistemas de rodamiento están en contacto con componentes de acero con alto contenido en cromo y carbón. La grasa funciona como una esponja que retiene y libera aceite y es susceptible a las condiciones de temperatura y el tiempo de operación, pues estos parámetros debilitan las propiedades del material. Su degradación y contaminación puede tener un marcado efecto en la claridad y color. La oxidación es la reacción más predominante en un lubricante en servicio y es una causa común de la formación de cuerpos de color, ocasionando oscurecimiento gradual del aceite [4]. El proceso de degradación de las grasas ha sido estudiado considerando los efectos de tratamientos térmicos, presión de operación y condiciones reológicas, en dónde se identifican las transiciones térmicas características, descomposición y pérdida de peso, así como efectos del porcentaje de aditivos y espesantes [5][6][7]. Por lo tanto, es indispensable observar el efecto del tiempo de operación de un rodamiento de robot industrial en el deterioro de la grasa y las posibles consecuencias sobre su estructura y naturaleza química.

La predicción del comportamiento futuro del robot requiere tener en cuenta el plan de producción del robot, así como el efecto de degradación. Como el plan de producción determina la carga del robot, afecta directamente el proceso de degradación [8].

En este trabajo, se evalúan las condiciones de deterioro por contaminación y oxidación de la grasa como función del tiempo de operación en el rodamiento de un robot industrial, y su posible efecto sobre la composición y estabilidad del material. Se plantea una relación directa entre el tiempo de operación en la zona de desgaste con la tasa de contaminación de partículas metálicas.

2. Metodología

Se estudió el lubricante comercial llamado Vigogrease de la marca Nabtesco que estuvo en operación en rodamientos de un robot industrial de 6 ejes. Los rodamientos se albergan en los ejes, cada eje posee una terminal para inyectar grasa nueva y una terminal para liberar grasa vieja. Se colectaron 10 muestras de 10.5 g aproximadamente por periodos de 1000 h hasta llegar al tiempo de reemplazo sugerido por el fabricante (11520 h) y posteriormente, se evaluó la grasa cada 150 h hasta alcanzar las 15000 h de uso con el objetivo de cuantificar la contaminación por partículas. Se empleó una grasa de Litio que está formulada para rodamientos de engranes reductivos y está compuesta de aceite sintético de hidrocarburos y de mineral refinado, espesantes de litio y aditivos base molibdeno y zinc [9]. Las muestras correspondientes a intervalos de 3000 h fueron analizadas por inspección visual y microscopia óptica empleando un microscopio marca Keyence VHX-970 con aumentos entre 30 y 200X. Así mismo, las características de descomposición química, estabilidad térmica y estructural de las muestras fueron evaluadas mediante

calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA) y análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los análisis DSC fueron realizados mediante un equipo marca TA instruments Inc USA modelo Q2000 V24.10, con módulo de celda RC estándar. Se empleó el método de evaluación de temperaturas de transición y entalpías de fusión ASTM D3418 aplicando ciclos de calentamiento y enfriamiento en atmósfera de nitrógeno en un rango de –80 a 150 °C. Las medidas de TGA se realizaron con un equipo marca TA instruments modelo Q50 V20.10, aplicando un ciclo de calentamiento de 40 a 600 °C con rampas de 10 °C por minuto en atmósfera de nitrógeno. El módulo de espectroscopía FTIR incluido en el equipo Q50 V20.10 permitió obtener espectros en los rangos de energía de 600 a 4000 cm^{-1} aplicando la norma ASTM E-1252.

3. Resultados y análisis

3.1 Efecto del tiempo de operación sobre las características físicas y contaminación de las grasas.

La parte superior de la figura 1 muestra las grasas monitoreadas por inspección visual ordenadas de izquierda a derecha desde el inicio hasta la grasa del muestreo 15000 h de operación. La parte inferior de la figura 1 presenta las micrografías tomadas correspondientes a cada valor de tiempo. La tonalidad de la grasa nueva corresponde al color estándar de este tipo de lubricantes base Litio. El oscurecimiento observado a medida que aumenta el tiempo de operación está relacionado con el proceso de oxidación debido a posible absorción de humedad, inclusión de polvo y hollín. Este fenómeno tiene efectos negativos sobre las grasas lubricantes, ya que favorece la formación de depósitos y sedimentos, disminuye la viscosidad y, en consecuencia, la capacidad de lubricación aumentando la fricción y el desgaste de las superficies en contacto. Las micrografías permitieron identificar pequeñas burbujas de aire entre las placas del portaobjetos para todos los tiempos de operación. Adicionalmente, se observaron incrustaciones de partículas con tonalidad más oscura a partir de 12000 h de operación. La revisión exhaustiva mediante el lavado de las grasas permitió identificar contaminación por elementos metálicos probablemente producto del desgaste en los sistemas de rodamiento.

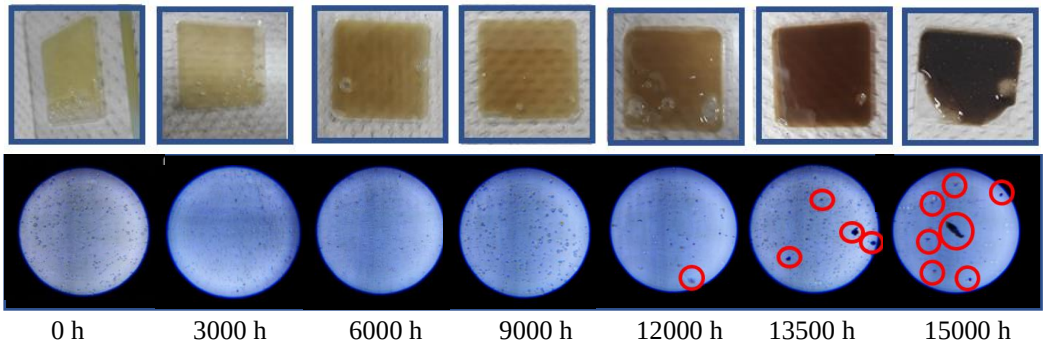


Figura 1. Micrografías ópticas de grasas en función de tiempo de operación. Aumento de imagen desde 30 hasta 200x.

La figura 2 muestra la cantidad de partículas P identificadas en las grasas como función del tiempo de servicio t. Esta cuantificación se realizó mediante conteo estadístico para todos los tiempos de operación considerando muestreos de 10 especímenes de 10.5 g por intervalo de 150 h, siendo este seleccionado de acuerdo con la disponibilidad del equipo.

Se observó que durante las primeras 12300 h no hubo evidencia aparente de partículas en el material examinado. Esto es, 682 h por encima del periodo de reemplazo recomendado por el fabricante, representando un +5.92% de operación adicional. Sin embargo, a partir de ese tiempo y hasta las 15000 h se identificaron inclusiones sólidas con un incremento progresivo hasta 7 partículas por cada 10 g de material La derivada de la función P respecto de t permite observar la razón de contaminación por partículas metálicas en la grasa dependiente del tiempo en el dominio examinado de 12000 a 15000 h. El comportamiento de la curva se ajustó a un modelo polinomial de segundo orden, para el cual se presentan las constantes de ajuste a, b, c y el coeficiente de correlación R^2 en el interior de la figura 2, cuya importancia resalta en que una estimación a 14000 h de servicio muestra que la tasa de contaminación es 0.3 partículas por kilogramo por hora, lo cual representa una contribución importante al deterioro de los rodamientos y del material lubricante. El daño de la grasa contenida en un robot a través del tiempo puede determinar el punto de no retorno en el cual se vuelve inoperante el equipo. Estas estimaciones contribuyen a entender y optimizar los tiempos de operación y mantenimientos en los procesos industriales.

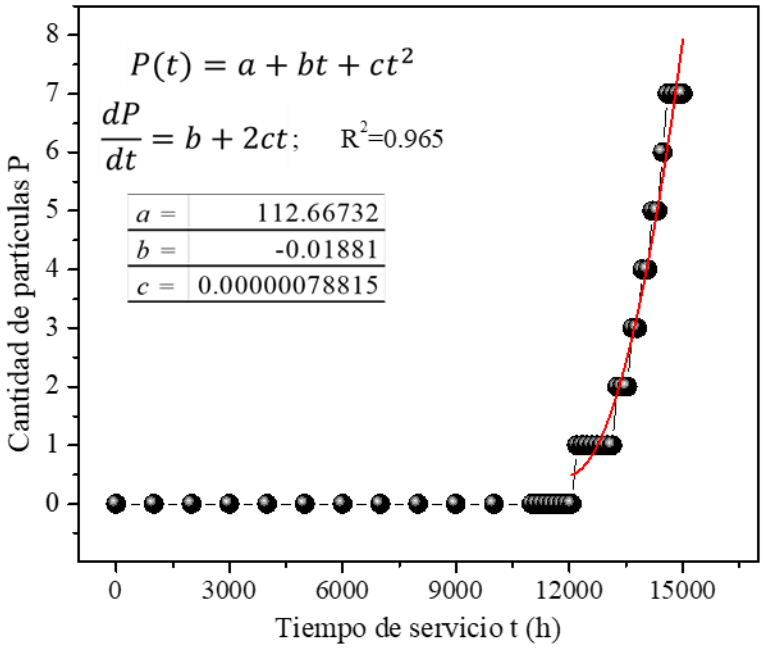


Figura 2. Cuantificación de partículas en las grasas en función del tiempo se servicio.

3.2 Estudio de las características termogravimétricas y estabilidad estructural y química de las grasas base Litio.

El efecto del tiempo de operación, reflejado en oxidación y contaminación de partículas metálicas sobre la descomposición térmica y estabilidad de grupos funcionales de las grasas se analizaron mediante DSC, TGA y FTIR.

La figura 3 muestra el análisis DSC de la grasa de muestras nueva y con 9000 y 15000 h de tiempo de operación para ciclos de calentamiento y enfriamiento entre -80 y 150 °C. En general, se identificó que para todos los tiempos de servicio los perfiles térmicos son muy similares en los rangos evaluados,

excepto por una diferencia de 0.05 W/g entre las muestras nueva y 9000 h, la cual puede ser atribuible a variabilidades en el contenido de aditivos y antioxidantes de los lotes de cada grasa. En la curva de calentamiento el flujo de calor llegó a -0.38 W/g mostrando una variación significativa en -10 °C correspondiente a la transición de fase sólida → líquida de la grasa. Este fenómeno involucra un proceso endotérmico en el cual la muestra absorbe energía para cambiar su estado. En la curva de enfriamiento el cambio energético de la transición líquido → sólido se dio a una temperatura de -19 °C. Esto puede estar asociado al proceso de eliminación de humedad residual durante el calentamiento deshidratando el material y, por consiguiente, favoreciendo un comportamiento distinto durante el enfriamiento [6][7]. El estado de degradación de las grasas y contenido de partículas no fue detectable en el rango de medición evaluado. Esta dificultad de la técnica DSC para evaluar el deterioro de las grasas ha sido reportado anteriormente por [10].

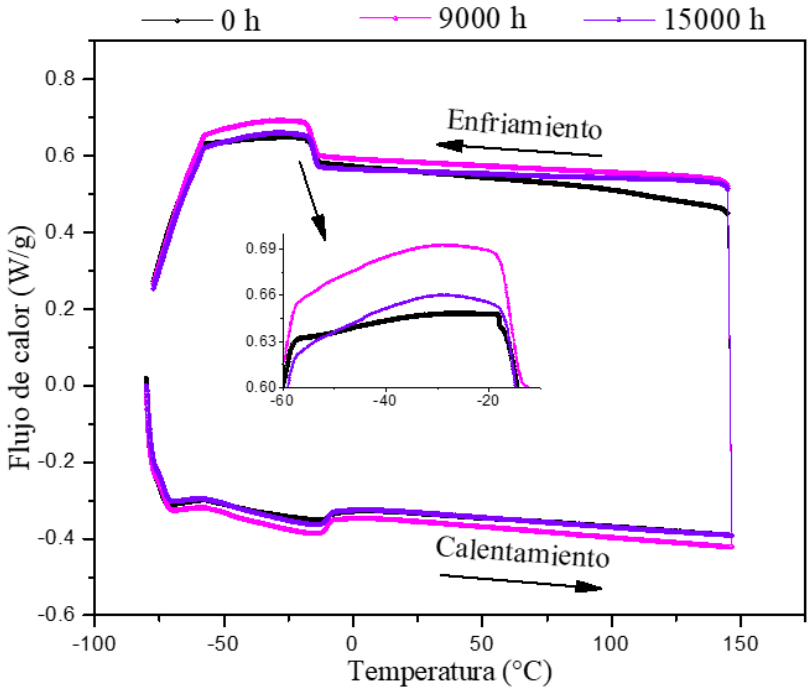


Figura 3. Análisis DSC en ciclo de calentamiento y enfriamiento de grasa base litio para 0, 9000 y 15000 h.

La figura 4 muestra el análisis TGA de las muestras nueva y con 9000 y 15000 horas de operación, así como la derivada numérica del peso en función de la temperatura en el rango de 40 a 600 °C. Los perfiles de descomposición térmica de las grasas tienen comportamientos similares para las 3 muestras medidas. Lo cual, aparentemente indica que el efecto de degradación por oxidación y contaminación de partículas metálicas no es detectable en el rango medido. Se puede observar que la descomposición de las grasas se produce en dos etapas. La primera, con una temperatura promedio de inicio de 263 °C y una taza de pérdida de masa muy elevada hasta los 375 °C, siendo la más relevante, puesto que en ella se pierde la mayoría de los componentes, incluyendo aceite mineral, aditivos y espesante base litio llegando hasta el 11% del peso original [7][11][12]. La segunda etapa va hasta la temperatura final de 470 °C y

presentó una tasa de pérdida de material menor, en la cual se degrada el material restante hasta el 3%. Cabe resaltar que la muestra nueva tiene mayor pérdida de material en la segunda etapa de descomposición 430 °C comparada con las muestras de 9000 y 15000 horas. Esto se asocia con una mayor concentración de aditivos y compuestos de litio y molibdeno que se van degradando con el tiempo de servicio.

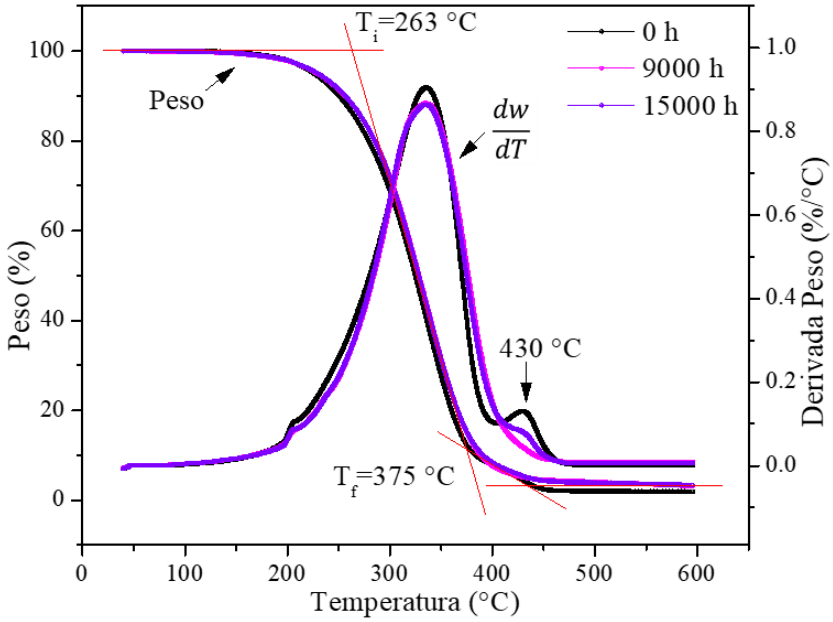


Figura. 4. Análisis TGA y derivada del Peso vs temperatura en grasa base litio para 0, 9000 y 15000 h.

El estudio de espectroscopía por FTIR es mostrado en la figura 5 para las 3 grasas características en el rango de energía de 600 a 4000 cm^{-1}. Se realizó un aumento del rango de 2700 a 3100 cm^{-1} para clarificar las curvas superpuestas en esa región. Los picos característicos fueron identificados en el rango infrarrojo medio y sus correspondientes modos vibracionales, bandas y posibles asignaciones se presentan en la tabla 1. Los picos observados en 2920.5 y 2851.8 cm^{-1} corresponden a los modos vibracionales de tensión asimétrica tipo CH2, mientras que aquel de igual naturaleza presente a 2952.8 cm^{-1} es de tipo CH3. Todos muestran enlace sencillo C-H y se pueden asociar con hidrocarburos tipo alifáticos. Fue posible identificar contenido de carboxilato y espesante de litio tipo estearato en la grasa mediante la intensidad del pico a 1579.6 cm^{-1} con modo de vibración de tensión asimétrico. Las intensidades de 1456.9 y 1376.6 cm^{-1} con enlace sencillo C-H correspondientes a vibraciones de flexión y tensión simétricas indican contenido del aceite base componente de la grasa. No fue posible identificar claramente la línea a 1218.3 cm^{-1} pero los reportes de la literatura sugieren que corresponde a un aditivo con politetrafluoroetileno (PTFE).

Finalmente, las líneas a 976 y 721.5 cm^{-1} fueron asociadas con los modos vibracionales de balanceo y tensión asimétrico del enlace C-H, respectivamente [13] [14] [15].

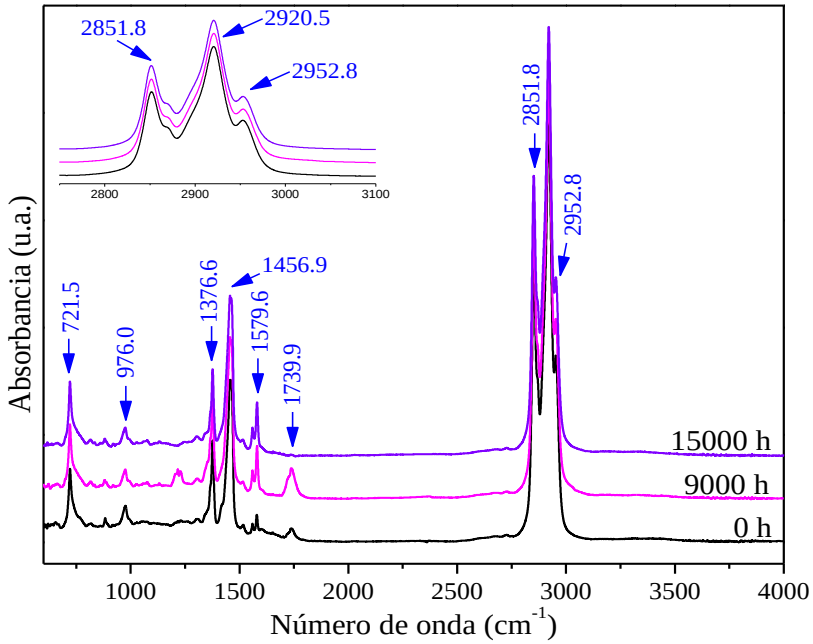


Figura 5. Espectro FTIR de grasa base Litio para 0, 9000 y 15000 h.

Se puede observar que la estructura de las grasas permanece invariante para los distintos tiempos de servicio aplicados, excepto por una banda característica en 1739.9 cm^{-1}, el cual tiene un doble enlace C=O y evidencia la presencia de un aditivo tipo éster del molibdeno. Esta banda está presente en la muestra nueva y a 9000 h, pero desaparece a 15000 h de servicio. Este aditivo de compuestos de molibdeno está presente en la grasa nueva y aquellas con relativo bajo tiempo de operación, pero que desaparece durante la degradación y contaminación con partículas metálicas y residuos para tiempos de servicio prolongados.

Numero de onda (cm^{-1})	*Banda*	*Tipo de vibración*	*Posible alineación*
721.5	C-H	$\rho(CH_2)_n$	
976	C-H	$v_{as}(CH_2)$	
1218.3			Aditivo PTFE
1376.6	C-H	$\beta_s(CH_3)_n$	Aceite base
1456.9	C-H	$v_s(COO^-) + \beta_s(CH_2)$	
1579.6	COO	$v_{as}(COO^-)$	Carboxilato, espesante de Litio (Estearato)
1739.9		v_{as}(C=O) Enlace de hidrogeno	Aditivo, ester de Mo
2851.8	C-H	$v_{as}(CH_2)$	Alifáticos
2920.5	C-H	$v_{as}(CH_2)$	Alifáticos
2952.8	C-H	$v_{as}(CH_2)$	Alifáticos

Vibraciones: v: Tensión; β: Flexión en plano ; s: Simétrico; as: Asimétrico; ρ: Balanceo.

Tabla 1. Posición de picos, bandas y grupos funcionales asignados para grasa de Litio.
Fuente: Elaboración propia con identificaciones de picos de [13] [14] [15]

Los efectos de la contaminación por partículas metálicas, polvo y oxidación de la grasa sobre su estructura y constitución no fueron detectables mediante los análisis termogravimétricos y espectroscópicos en los rangos realizados.

4. Conclusiones

En este trabajo se evaluó el efecto del tiempo de operación en rodamientos de un robot industrial sobre las características físicas, químicas, térmicas y estructurales de grasa de litio desde 0 hasta 15000 h. El lubricante presento gradientes en su color desde amarillo claro para la grasa nueva hasta café oscuro a 15000 h. Durante las primeras 12000 h no se encontraron inclusiones sólidas en las muestras, pero a partir de ese tiempo se identificaron partículas metálicas que pueden ser atribuidas a desprendimientos del rodamiento.

El comportamiento de las partículas en función del tiempo se ajustó a un modelo polinomial de segundo orden con coeficiente de correlación R^2=0.965. Se pudo estimar la tasa de contaminación en la grasa para 14000 h en 0.3 partículas/kg/h, la cual representa un deterioro relevante para los lubricantes y rodamientos.

Mediante análisis DSC entre -80 y 150 °C se identificaron transiciones de fase Liq→Sol a -19 °C durante el enfriamiento y Sol→Liq a -10 °C durante el calentamiento llegando a flujos de calor de hasta -0.38 W/g. Las pérdidas de peso de la grasa fueron evaluadas mediante TGA en un rango de 40 a 600 °C. Se identificó que la descomposición del material se produce en dos etapas, la primera entre 263 y 375 °C, en la cual se pierde mayoría de los componentes y la segunda se extendió hasta 470 °C. En la grasa nueva se observó una variación relevante de pérdida de peso a 430 °C, que disminuyó para las muestras de grasa con tiempos de operación de 9000 y 15000 h.

Mediante espectroscopía FTIR fue posible identificar en todas las muestras los grupos funcionales alifáticos con vibraciones de tensión asimétrica, grupo carboxilato correspondiente al espesante de litio e intensidades con tensión en plano simétrico correspondientes a los aceites base. El pico de 1739.9 cm^{-1} fue identificado con un modo de vibración de tensión asimétrica correspondiente a un aditivo de éster de molibdeno, el cual estuvo presente en la grasa nueva y de 9000 h, pero desapareció para 15000 h.

En general, el tiempo de operación generó cambios en el nivel de oxidación, color y contaminación por partículas metálicas y polvo en la grasa, pero no mostró efectos sobre las características químicas, térmicas y estructurales del lubricante. Estos resultados sugieren que la grasa lubricante base litio empleada en rodamientos de robots industriales para procesos de producción no se ven afectadas en su estructura, modos vibracionales, ni cinéticas de descomposición en los tiempos de operación evaluados. Estas estimaciones contribuyen a entender y optimizar los tiempos de operación y mantenimientos en los procesos industriales.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del laboratorio de caracterización de polímeros del CIATEQ unidad Estado de México y al programa Investigadores por México del CONACyT, con los proyectos 674 y 850.

6. Bibliografía

[1]Bartoš, M., Bulej, V., Bohušík, M., Stancek, J., Ivanov, V., & Macek, P. (2021). An overview of robot applications in automotive industry. Transportation Research Procedia, 55,

837–844. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2021.07.052

[2] M. Cerrada, R.V. Sánchez, C. Li, F. Pacheco, D. Cabrera, J. Valente de Oliveira, R. E. Vasquez. A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings, Mech. Syst. Signal Process. (2018) 169–196 https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.008

[3] Jeng-Haur Horng a, Thi-Na Ta a b, Ru-Yang Jheng a, Ming-Wei Huang a, Ke-Shan Zhang c, Elena Torskaya d (2023) Effect of liquid contaminants on tribological performance of greases. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205054

[4]Timken. (2015). Análisis de daños en los rodamientos Timken y Guía de referencia sobre lubricación. Retrieved from www.timken.com/warnings.

[5]Dresel, W., & Heckler, R.-P. (2014). Lubricating Grease Applications. Encyclopedia of Lubricants and Lubrication, 1069–1076. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_17

[6]Moreno, G., Valencia, C., de Paz, M. V., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2008). Rheology and microstructure of lithium lubricating greases modified with a reactive diisocyanate-terminated polymer: Influence of polymer addition protocol. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47(4), 528–538. https://doi.org/10.1016/J.CEP.2006.11.006

[7]Sánchez, R., Valencia, C., & Franco, J. M. (2014). Rheological and Tribological Characterization of a New Acylated Chitosan–Based Biodegradable Lubricating Grease: A Comparative Study with Traditional Lithium and Calcium Greases. Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10402004.2014.880541, 57(3), 445–454. https://doi.org/10.1080/10402004.2014.880541

[8] P. Aivaliotis, Z. Arkouli, K. Georgoulias, S. Makris (2021). Degradation curves integration in physics-based models: Towards the predictive maintenance of industrial robots. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102177

[9]KYODO YUSHI CO. (2014). VIGOGREASE RE0. Retrieved March 17, 2023, from https://www.nabtescomotioncontrol.com/pdfs/vigo-grease-msds.pdf

[10]Aranzabe, E., Marcaide, A., & Ferret, R. (2017). Estudio de diferentes técnicas de detección de la degradación de una grasa.

[11]*Abdelkhalik, A., Elsayed, H., Hassan, M., Nour, M., Shehata, A. B., & Helmy, M. (2018). Using thermal analysis techniques for identifying the flash point temperatures of some lubricant and base oils. Egyptian Journal of Petroleum, 27(1), 131–136. https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2017.02.006*

[12]Fan, X., Xia, Y., Wang, L., Pu, J., Chen, T., & Zhang, H. (2014). Study of the conductivity and tribological performance of ionic liquid and lithium greases. Tribology Letters, 53(1), 281–291. https://doi.org/10.1007/S11249-013-0266-Z/METRICS

[13]Hurley, S., & Cann, P. M. (1999). IR Spectroscopic Analysis of Grease Lubricant Films in Rolling Contacts. Tribology Series, 36, 589–600. https://doi.org/10.1016/S0167-8922(99)80079-0

[14]Jiabao, P., Yanhai, C., & Jinyong, Y. (2015). Effect of heat treatment on the lubricating properties of lithium lubricating grease. RSC Advances, 5(72), 58686–58693. https://doi.org/10.1039/C5RA08917D

[15]Paszkowski, M., Olsztyńska-Janus, S., & Wilk, I. (2014). Studies of the kinetics of lithium grease microstructure regeneration by means of dynamic oscillatory rheological tests and FTIR-ATR spectroscopy. Tribology Letters, 56(1), 107–117. https://doi.org/10.1007/S11249-014-0390-4/METRICS