



Anexo E





Índice

1.	Informe de hechos en tomografía computarizada.	2
2.	Inspección destructiva de los actuadores lineales electromecánicos.	3
2.1.	Actuador lineal electromecánico izquierdo de alabeo (roll).	4
2.2.	Actuador lineal electromecánico derecho de alabeo (roll).	7
2.3.	Actuador lineal electromecánico izquierdo de cabeceo (pitch).	9
2.4.	Actuador lineal electromecánico derecho de cabeceo (pitch).	10
2.5.	Actuador lineal electromecánico de guiñada (yaw).	11
2.6.	Hallažgos.	12
3.	Reporte de hechos de la inspección al actuador lineal de alabeo (roll) de SASI.	13
3.1.	Actuador lineal de alabeo de SASI: Tornillo interno suelto como afecta el comportamiento del helicóptero.	13
3.2.	Descripción del sistema.	13
3.3.	Análisis de un tornillo suelto que toca las terminales de la tarjeta electrónica.	14
3.4.	Análisis del comportamiento del helipilot.	14
3.5.	Evaluación de impacto a nivel del sistema.	16
3.6.	Evaluación de impacto a nivel helicóptero.	16
3.7.	Conclusiones.	16
4.	Reporte de hechos de la inspección al cuerpo del actuador lineal de roll (alabeo) de SASI.	17
4.1.	Carcasa del actuador lineal de SASI, tarjeta electrónica y tornillos de montaje, espaciadores y arandelas de seguridad.	17



1. Informe de hechos en tomografía computarizada.

Los actuadores lineales de álabeo lado izquierdo y derecho, los actuadores lineales del cabeceo izquierdo y derecho, y el actuador lineal de guiñada se sometieron a exploración de tomografía computarizada (TC) para documentar sus condiciones internas. El 09 de mayo de 2019 se realizó la conferencia de los hallazgos encontrados. Los trabajos de escaneo se realizaron en Varex, Chicago, Illinois, EUA., el cual estuvo bajo la dirección de la NTSB.

Actuador lineal de guiñada:

- El LVDT aparentemente no está centrado dentro de su eje.
- La base del tornillo de bola estaba a 4,01 mm del tope de retracción y a 6,08 mm del tope de extensión.
- Existen indicios de virutas de metal dentro de la cavidad del tornillo de bola.
- Los pines de la placa de freno móvil parecen estar enganchados con las muescas de la placa estacionaria.
- No hubo indicios de soldadura presente en el cable de los cepillos a las conexiones del elemento.
- Los segmentos del motor en contacto con los cepillos parecen estar rotados.
- Algunos de los pines de la tarjeta electrónica están desplazados.
- Se observaron partículas de alta densidad en el rodamiento # 2

Actuador lineal número 1:

- El LVDT parecía no estar centrado dentro de su eje.
- La base del tornillo de bola estaba a 5,97 mm del tope de retracción.
- No hubo indicios de virutas de metal dentro de la cavidad del tornillo de bola.
- Los pines de la placa de freno móvil parecen estar enganchados con las muescas de la placa estacionaria.
- No hubo indicios de soldadura presente en el cable de los cepillos para unir las conexiones del elemento.
- Había un objeto de densidad media presente dentro del cuerpo del actuador.
- Había un objeto de alta densidad presente dentro del actuador.



Fig. 1.a. Se observan dos tornillos sueltos y una arandela

Actuador lineal número 2:

- El eje del LVDT parece estar doblado.
- La base del tornillo de bola estaba a 5,10 mm del tope de extensión.
- No hubo indicios de virutas de metal dentro de la cavidad del tornillo de bola.
- Los pines de la placa del freno móvil parecen no estar enganchados con las muescas de la placa estacionaria: los pines descansan sobre la placa estacionaria.
- Existen indicios de soldadura presente en el cable del cepillo para unir las conexiones del elemento.
- Algunos de las terminales de la tarjeta electrónica están desplazados.



- g. El tornillo de fijación del arnés de cables parece estar roto.

Actuador lineal número 3:

- a. El eje LVDT parecía no estar centrado dentro de su eje.
- b. La base del tornillo de bola estaba a 5,20 mm del tope de extensión.
- c. Hay indicios de virutas de metal dentro de la cavidad del tornillo de bola.
- d. Los pines de la placa de freno móvil parecen no estar enganchados con las muescas de la placa estacionaria; los pasadores descansaban sobre la placa estacionaria.
- e. No había indicios de soldadura presente en el cable del cepillo para unir las conexiones del elemento.
- f. Algunos de las terminales de la tarjeta electrónica están desplazados.
- g. Se observó una anomalía en la soldadura en una terminal de la tarjeta electrónica.

Actuador lineal número 4:

- a. El eje del LVDT parece estar centrado.
- b. La base del tornillo de bola estaba a 5,78 mm del tope de retracción.
- c. No hay indicios de virutas de metal dentro de la cavidad del tornillo de bola.
- d. La placa del freno móvil parecía no estar completamente enganchada con la placa estacionaria - dos pasadores parecían estar enganchados con las muescas de la placa estacionaria - el pasador restante descansaba en la parte superior de la placa estacionaria.
- e. Había indicios de soldadura presente en el cable del cepillo para unir las conexiones del elemento.
- f. Los cepillos del motor parecían estar dañadas.
- g. Había cables dentro del actuador que parecían terminar con un aislamiento que se extendía más allá del extremo del cable.

2. Inspección destructiva de los actuadores lineales electromecánicos.

El grupo de investigadores (NTSB, EASA y DGAC) y expertos del fabricante (Leonardo Helicopters y Honeywell), se reunieron en las instalaciones de Honeywell en Boyne City, Michigan, del 23 al 24 de julio de 2019, para realizar la inspección destructiva a los 5 actuadores lineales electromecánicos, 2 de alabeo (roll), 2 de cabeceo (pitch) y 1 de guiñada (yaw).



2.a Los cinco actuadores lineales electromecánicos como fueron encontrados

Todas las referencias son de atrás hacia adelante, a menos que se especifique lo contrario.

2.1. Actuador lineal electromecánico izquierdo de alabeo (roll).

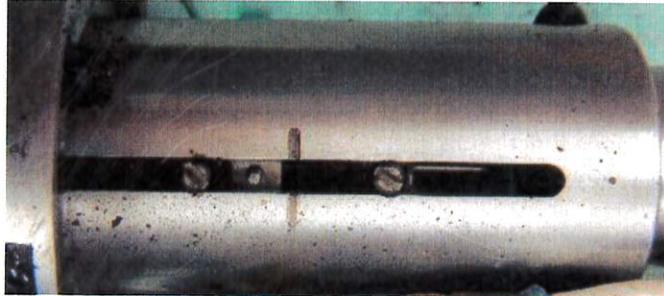
- Posición izquierda (N/P 4012373-909) N/S 0908L409
- Todavía tenía la terminal del eslabón conectada a su extremo de salida. La contratuerca, (la arandela dentada) y la arandela de bloqueo (pestaña de bloqueo) estaban presentes, pero el cable de seguridad no estaba.



2.1.a. Actuadores lineales de alabeo (roll) izquierdo (SAS1) y derecho (SAS2)



- El tubo de conexión permaneció unido a este actuador. Una pequeña porción de la carcasa del actuador lineal de banqueo (roll) derecho estaba unida al tubo de conexión. No había cable de seguridad en la tuerca de conexión del tubo.
 - El tubo de conexión fue removido por el experto de Honeywell.
 - El LVDT¹ no sobresalía de la carcasa y no estaba fracturado.
 - El ballscrew (tornillo de bola) permaneció alineado con las marcas de alineación en la carcasa.



2.1.b. El tornillo de bola se observó en posición de retraído

- Se removieron los tornillos de la cubierta (había alambre de seguridad en cada tornillo) y se retiró la cubierta. En general, el cuerpo del actuador parecía estar en buenas condiciones.
- El tope de carrera (unido al eje del tornillo de bola) estaba al lado del anillo de ajuste de carrera del lado de extensión. Esta extensión del actuador se relaciona con un banqueo hacia la izquierda.
- Se encontró un pedazo de residuo metálico en el diámetro interior de la carcasa. La profundidad de la pieza desde el extremo de mayor diámetro (donde se ubica el extremo de la varilla larga) era de aproximadamente 2.165 pulgadas.
- Se observó una huella en el cuerpo exterior del actuador. La huella comenzó desde el extremo del cuerpo (donde se ubica el extremo de la varilla larga) y tenía aproximadamente 1.642 pulgadas de longitud, después proseguía un patrón en zigzag. El patrón de zig-zag pasó sobre una cubierta de color naranja transparente que cubre el cable del motor. Es probable que este daño se haya producido durante la extracción de la cubierta.
- Los tornillos de soporte externo de la tarjeta electrónica no estaban presentes, por lo que la tarjeta electrónica estaba suelta en ese extremo, sin embargo, permanecía conectada al cuerpo del actuador lineal en el extremo opuesto. Los tornillos que se encontraban sueltos dentro del cuerpo tenían su arandela.



2.1.c. Dos tornillos delanteros que sujetan la tarjeta al cuerpo del actuador no se encontraron en su posición de diseño

¹ Linear Variable Displacement Transformer (transformador de desplazamiento lineal variable)



- Durante el corte de la banda que mantiene unidos los cables, se encontró un pedazo de cable negro separado del resto de los cables; un extremo tenía apariencia de gancho, que se presume era el extremo que estaba conectado a uno de los 17 puntos de conexión de la tarjeta electrónica. La terminal 11, donde normalmente va conectado el cable negro, no tenía ningún cable adherido.
- Verificación de continuidad eléctrica:

Componente	Medida
LVDT output continuity check:	645 ohms
LVDT excitation:	198 ohms
Brake:	short circuit
Motor:	46 ohms
Diode function, normal:	1 ohm
Diode function, reverse:	1 ohm
Diode:	Ningún cambio significativo al cambiar la polaridad

- Prueba funcional:
 - Comprobación de la funcionalidad de LVDT.
 - ✓ Cuando se energizó, la lectura de LVDT fue de aproximadamente 5.9 volts. La lectura debió de estar más cerca de aproximadamente 2 a 2.5 V.
 - Comprobación de la funcionalidad del freno.
 - ✓ El freno no funcionó cuando se energizó. Se modificó el cableado para sacar el diodo del circuito, después de lo cual se energizó el freno, pero no hubo movimiento (había un corto circuito). Usando un desarmador a través del puerto de acceso se pudo mover axialmente para desconectarla del motor.
 - Comprobación de la funcionalidad del motor.
 - ✓ Se energizó el motor y este intentó girar, pero la rotación se vio impedida por la estructura del freno (brake).
 - ✓ Se utilizaron varios desarmadores para levantar la estructura del freno y separarlo del motor y se energizó nuevamente el motor sin embargo no hubo movimiento del núcleo del motor, pero se sentía (en la mano) una respuesta de que el motor intentaba moverse.
 - ✓ Se pudo mover el extremo en forma de rosca del motor en la dirección de rotación, se desplazó hasta el tope de la carrera, habiendo continuidad desde el tope de carrera, al extremo de salida del motor.
- Desensamble
 - Los dos tornillos y arandelas más cercanas a la base del actuador lineal estaban instalados en la placa del circuito electrónico. La placa de circuito electrónico se retiró de la carcasa frontal.
 - ✓ La rosca de los tornillos que estaban unidos a la tarjeta electrónica tenía una apariencia limpia, la parte final de los tornillos estaban brillantes, concordando con la conexión de la rosca al cuerpo del actuador.
 - ✓ Para los tornillos que estaban sueltos, su rosca mostraba restos en su superficie.
 - ✓ En la parte frontal del actuador, en uno de los dos orificios para los tornillos (el del lado interior de la carcasa) había material levantado con huella de rosca.
 - El extremo del vástago con rosca se cortó para facilitar la separación de la carcasa trasera del motor y el tornillo de bolas.
 - LVDT
 - ✓ Cuando se movió el tornillo de bola de un extremo al otro, el voltaje cambió de 8,7 V (retracción completa) a 6,0 V (extensión completa). Cuando se detuvo el tornillo de bola en el cero mecánico, la lectura del voltaje fue de aproximadamente 7,6 V.



- ✓ Cuando se realizaron pruebas al LVDT, el voltaje era nulo por debajo de 1.0V.
- Freno
 - ✓ La estructura del freno se pudo mover sin restricciones. Los resortes de la armadura eran funcionales.
 - ✓ El magneto del freno fue removido y se verificó su funcionalidad.
 - Se aplicó energía al magneto, pero la armadura no se adhería al motor
 - Había un corto circuito en el ensamble del magneto.
- Motor
 - ✓ Los cuatro cepillos estaban instalados e intactos.
 - ✓ Para el motor instalado en este actuador, el fabricante del motor es Koll Morgan (código 11384).
 - ✓ El cojinete trasero de la carcasa podía girarse libremente.
- La chaveta estaba presente entre los chaveteros en el tornillo de bola y el rotor.
- El tornillo de bola y el anillo de ajuste fueron retirados. La tuerca de bola exhibió una rotación suave sin evidencia de atascamiento. Se encontraron residuos en el anillo de ajuste y las superficies del tornillo de bola. Los residuos fueron recopilados para su análisis.

2.2. Actuador lineal electromecánico derecho de alabeo (roll).

- Posición derecha (N/P 4012373-909) N/S Ver 3-118.
- La carcasa del actuador estaba fracturada en su extremo interior. El extremo exterior de la carcasa estaba fracturado y parcialmente separado. La cuerda del extremo exterior estaba fracturada.
- El chavetero del tornillo de bola (característica antirrotación) permaneció alineado con la marca de alineación en la carcasa.
- El extremo exterior de la carcasa frontal se fracturó y se separó cerca de la ranura de la junta tórica, exponiendo el LVDT.
- En la etiqueta de datos remanentes en el alojamiento, "24" estaba visible en la línea del número de serie
- Se encontró una etiqueta de reparación en la carcasa del actuador. La etiqueta era parcialmente legible y se leía:

Precision Accessory and Instruments
A PAG Company
Atlanta 404-767-5900
Repair Station ZV4R714M
www.precisionaccessories.com

- Se retiraron los tornillos de la cubierta (había cables de seguridad en cada tornillo) y la cubierta se retiró a la fuerza con un martillo. El cuerpo del actuador tenía suciedad en partes de su superficie, así como los componentes internos con los anillos de ajuste de carrera y el tope de carrera.
- El tope de carrera estaba al lado del anillo de ajuste de carrera, del lado de extensión. La extensión del actuador se correlaciona con una entrada de alabeo hacia la izquierda.



2.1.d. Condiciones externas del actuador 4 (roll 2, SAS2)

- La tarjeta electrónica permaneció conectada al cuerpo del actuador.
- Prueba de continuidad.

Componente	Medida
LVDT output:	844 ohms
LVDT input (excitation):	197 ohms
Brake:	circuit was open
Motor:	circuit was open
Diode function, normal:	open
Diode function, reverse:	4 ohm
Diode:	Ningún cambio significativo al cambiar la polaridad

- Prueba funcional:
 - Prueba de funcionalidad del LVDT
 - ✓ El voltaje del LVDT mostró aproximadamente 11 V. El LVDT se movió manualmente y la lectura mostró 5.7 V. La disminución del voltaje fue consistente con la dirección del movimiento del LVDT desde la retracción hasta la extensión
 - Funcionalidad del freno
 - ✓ Al energizar el freno este no realizó ningún movimiento. Al observar el freno armado en las vistas de los puertos se verificó que el skewed en las imágenes del CT Scan dos pines estaban engarzados y un pin no.
 - Comprobación de la funcionalidad del motor
 - ✓ Se energizó el motor y el resultado fue que no realizó en ningún movimiento.
 - Basado en los resultados, la unidad no funciona eléctricamente.
- Desensamble
 - El cable del brake se encontró roto donde se encuentra el cableado. El cable violeta del brake no estaba conectado a la tarjeta electrónica en el puerto 12 pero el puerto estaba cubierto con sellador.



2.1.e. Tornillo de bola se encontró en posición a la derecha

- La prueba de continuidad del freno fue confirmada. El cableado del freno estaba conectado a una fuente de alimentación; esta prueba funcional del freno resultó en una operación exitosa del frenado.
- Se realizó la prueba de continuidad al cableado del motor sin embargo éste permanecía abierto.
- La tuerca de retención que sujeta la carcasa delantera a la carcasa trasera no pudo retirarse debido a la deformación de ésta. La tuerca y la carcasa fueron cortadas para facilitar la extracción lográndose extraer la carcasa frontal.
- El núcleo del motor permaneció con la carcasa trasera. El núcleo del motor no se pudo girar manualmente.
- El freno se mantuvo con la carcasa delantera. Se observó grasa degradada térmicamente en el diámetro interior de la caja del freno y en el tornillo de bola.
- Existió presencia de hollín en la superficie de la carcasa. Cuando se observó en el estereoscopio, se observaron indicios de picadura de corrosión en la superficie de la carcasa.
- La tuerca del tornillo de bola pudo ser rotada con la fuerza de la mano. La rotación de esta tuerca exhibió aspereza, pero no evidencia de atascamiento. El tornillo de bola pudo desplazar su carrera completa entre los anillos de ajuste.
- La llave estaba presente entre los chaveteros en el tornillo de bola y el rotor.
- El bloque del cepillo mostraba un código Ver 3 (Koll Morgan).
- El motor fue dañado debido a un impacto externo dentro de la carcasa trasera causando una deformación.
- Se observó en la cara exterior del motor los números Ver 3
- Con energía aplicada al LVDT, el voltaje cambió de 12.5 V (retracción completa) a 6 V (extensión completa). La manga del LVDT se desplazó hacia el interior de la carcasa durante la extracción de la carcasa [externa].

2.3. Actuador lineal electromecánico izquierdo de cabeceo (pitch).

- Posición izquierda (N/P 4012373-908) N/S Ver 3 333.
- La carcasa del actuador estaba fracturada en su extremo interior. Las roscas en el extremo exterior estaban fracturadas.
- El extremo exterior de la carcasa frontal se fracturó y se separó cerca de la ranura del sello tipo "O" exponiendo el LVDT.
- No había información legible en la etiqueta de datos remanentes en la carcasa.
- Se retiraron los tornillos de la cubierta (los alambres de seguridad estaban presentes en cada tornillo) y la cubierta se retiró con el apoyo de un martillo.



- El tope de carrera estaba al lado del anillo de ajuste del lado de retracción, corresponde a cabeceo abajo.
- Había suciedad en los componentes internos, incluidos el tope de carrera y ajuste del anillo, pero había menos suciedad en comparación con el Actuador 4.
- Prueba de continuidad

Componente	Medida
LVDT output:	896 ohms
LVDT input (excitation):	207 ohms
Brake:	72 ohms
Motor:	780 ohms
Diode function, normal:	60 ohms
Diode function, reverse:	12.5 ohm
Diode:	Ningún cambio significativo al cambiar la polaridad

- o Check LVDT functionality
 - ✓ Cuando el LVDT está en una posición completamente retraída, el voltaje debe ser de 2V. Cuando se activó el LVDT, la lectura de voltaje mostró 9.4V
 - ✓ Cuando el LVDT se movió manualmente, la lectura mostró aproximadamente 8 V. La dirección del movimiento del LVDT fue consistente con la caída de voltaje esperada. Mayor movimiento manual del LVDT resultó en una lectura de 4.5 V. Al final del LVDT se pudo observar saliendo por la carcasa frontal.
 - o Funcionalidad del freno
 - ✓ Cuando se energizó, el magneto se energizó para desengarzarse del núcleo del motor. Cuando se quitó la alimentación eléctrica, la armadura volvió a engarzarse al núcleo del motor.
 - o Comprobación de funcionalidad del motor
 - ✓ El tornillo de bola no se extendió y se retrajo cuando se le aplicó potencia al motor. Se observó un ligero movimiento de rotación del núcleo del motor cuando este fue energizado. Después de que el LVDT se movió manualmente y el motor se energizó, se escuchó un ruido sordo proveniente del motor, pero no se observó ningún movimiento del tornillo de bola. Se observó un ligero movimiento del tope de carrera, consistente con la continuidad del motor.
 - o La carcasa trasera se cortó para facilitar la extracción de la carcasa delantera.
 - o La tuerca del tornillo de bola pudo girarse manualmente en el tornillo de bola, pero había evidencia de que estaba atascada inicialmente. Se observó hollín en la parte visible del tornillo de bola. El balero en la carcasa frontal no pudo ser girado.
 - o La llave estaba presente entre los chaveteros, en el ball screw y el rotor.
 - o El fabricante del motor es Koll Morgan (código 11384).
 - o El rotor fue removido y se pudo observar el número **Ver 3** en el núcleo del motor.
 - o El rotor tenía daño superficial con la aparición de corrosión.
 - o El rodamiento de la carcasa trasera pudo girarse, pero mostraba signos de rugosidad.

2.4. Actuador lineal electromecánico derecho de cabeceo (pitch).

- Posición derecha (N/P 4012373-908) N/S **Ver 3** 1158.



- La carcasa del actuador estaba fracturada en su extremo interior. Las roscas en el extremo exterior estaban fracturadas.
- El extremo exterior de la carcasa frontal se fracturó y se separó cerca de las ranuras del empaque "O", exponiendo el LVDT.
- No había ninguna etiqueta de datos, presente en la carcasa.
- Se retiraron los tornillos de la cubierta (había alambres de seguridad en cada tornillo) y la cubierta se retiró con la utilización de una prensa.
- Hubo presencia de hollín en las superficies del lado interior del cuerpo del actuador. El hollín también estuvo presente en los componentes internos, incluyendo el tope de carrera y los anillos de ajuste.
- El tope de carrera se encontró junto al anillo de ajuste del lado de retracción lo que corresponde a la posición de cabeceo abajo.
- Prueba de continuidad

Componente	Medida
LVDT output:	open circuit
LVDT input (excitation):	0.2 ohms (shorted)
Brake:	76 ohms
Motor:	open circuit
Diode function, normal:	65 ohms
Diode function, reverse:	13 ohm
Diode:	Ningún cambio significativo al cambiar la polaridad

- Prueba de funcionalidad
 - Prueba funcional del LVDT
 - ✓ La lectura del LVDT mostró aproximadamente 29 mV, pero probablemente fue errónea debido a que el LVDT tenía un circuito abierto.
 - Prueba funcionalidad del freno
 - ✓ Cuando se energizó, el freno no funcionó. El movimiento mecánico del núcleo del motor no dio lugar al movimiento del freno.
 - Prueba funcional del motor
 - ✓ Al energizar el motor no produjo ningún movimiento en el núcleo.
 - Basados en estos resultados, la unidad no funcionó eléctricamente.
- Desensamble
 - La carcasa trasera estaba separada de la carcasa frontal.
 - El motor fue golpeado dentro de la carcasa trasera, debido a la deformación de ésta.
 - El número "3158" se vio en la exterior de la carcasa del freno.
 - La tuerca del tornillo de bola pudo girarse manualmente sin evidencia de atascamiento. La tuerca del tornillo de bola tenía evidencia de grasa de color rojizo y grasa degradada térmicamente. El rodamiento en la carcasa frontal se podía girar libremente.
 - La chaveta estaba presente entre los chaveteros en el tornillo de bola y el rotor
 - El tornillo de bola y el anillo de ajuste fueron retirados. El LVDT exhibió decoloración consistente con el daño por temperatura.

2.5. Actuador lineal electromecánico de guiñada (yaw).

- Posición única (N/P 4012373-905) N/S Ver 3 158.
- El actuador presentaba daño térmico externo. El tubo de conexión se retiró y el extremo exterior del LVDT pudo observarse.
- Los tornillos de la cubierta se quitaron a mano (no tenían torque). El cableado de seguridad estaba presente en cada tornillo. La cubierta fue removida.





- Los dos empaques tipo anillo de la carcasa se degradaron térmicamente y se desintegraron durante la extracción de la cubierta. La cubierta fue removida usando una prensa.
- Las superficies del cuerpo del actuador lineal y los componentes internos mostraron daños térmicos. Se observó presencia de hollín en las superficies de los componentes internos.
- Se observó material en la cubierta del actuador, posiblemente soldadura resolidificada, en el diámetro interno de la cubierta.
- La tarjeta electrónica estaba presente, pero algunas de los terminales se habían separado de la placa. Las comprobaciones de continuidad no se realizaron debido al daño térmico de la placa de circuito, así como en los cables.
- El tope de carrearera estaba aproximadamente a la mitad de la carrera entre los dos anillos de ajuste.



2.1.f. El tornillo de bola se encontró en posición intermedia

- Al actuador de guiñada no se le realizaron pruebas funcionales. El grupo discutió y estuvo de acuerdo en que no se realizaría más desmontaje en este momento por los daños y por evidencias de indicación que se observaron.

2.6. Hallazgos.

- En el panel de control del helicóptero, los sistemas SAS1 y SAS2 se ponen por defecto en la posición de apagado (OFF) cuando se pierde la alimentación de energía al helicóptero. Cabe mencionar que la posición predeterminada del interruptor ATT HOLD se pone por defecto en la posición de encendido (ON, hacia arriba) cuando se pierde la alimentación.
- El actuador de alabeo de SAS1 se encontró con un alabeo hacia la izquierda y el actuador de alabeo de SAS2 se encontró con un alabeo hacia la izquierda.
- El actuador de cabeceo de SAS1 se encontró nariz abajo y el actuador de cabeceo de SAS2 se encontró con nariz abajo.
- El actuador de guiñada de SAS1 se encontró en posición intermedia.
- El 30 de septiembre de 2019, el representante acreditado de la NTSB notificó que solicitó a Precision Accessory and Instruments en Atlanta, Georgia, si existen evidencias de tornillos sueltos de la tarjetas electrónicas en reparaciones anteriores, indicando que Honeywell revisó más de 5,000 registros de reparaciones efectuadas a actuadores lineales en las instalaciones de Honeywell y Otto, solamente encontraron solo un registro donde se asentó "**falta de tornillos-FPN: 2504349-52**" y "**arandelas, falta de bloqueo - PFN: 0164-2**", pero no especifica si los tornillos se encontraron dentro de la carcasa del actuador o no fueron instalados en absoluto.



3. Reporte de hechos de la inspección al actuador lineal de alabeo (roll) de SASI.

El grupo de investigadores (NTSB, EASA y DGAC) y expertos del fabricante (Leonardo Helicopters y Honeywell), al término de la reunión sostenida en las instalaciones de Honeywell en Boyne City, Michigan, del 23 al 24 de julio de 2019 dejaron la siguiente tarea:

3.1. Actuador lineal de alabeo de SASI: Tornillo interno suelto como afecta el comportamiento del helicóptero.

Leonardo Helicopters envió su reporte de fecha 15 de octubre de 2019, relacionado con las pruebas realizadas al actuador de abaleo del SASI, el cual al desensamblarlo presentaba en su interior dos tornillos sueltos, estos tornillos por diseño sujetan la tarjeta electrónica al cuerpo del actuador.

Los investigadores recuperaron del sitio del accidente los 5 actuadores lineales (Pitch LH/RH, Roll LH/RH, Yaw), los cuales fueron desensamblados e inspeccionados durante la visita a las instalaciones del fabricante (Honeywell) en Boyne City (Michigan) - EE. UU.) del 23 al 24 de julio. Representantes de LH, DGAC, NTSB y EASA se unieron al personal de Honeywell durante esta actividad.

Las actividades, lideradas por NTSB, se centraron en identificar cualquier signo de posible mal funcionamiento de cualquiera de los 5 actuadores lineales, en especial en los dos actuadores de alabeo, ya que los informes de testigos indicaron posibles oscilaciones en el eje de guiñada (yaw) para posteriormente una maniobra abrupta de alabeo a la izquierda (roll) del helicóptero. Como hallazgo principal, el actuador de alabeo derecho presentaba 2 de los 4 tornillos que mantienen la placa de circuito de control en posición de asegurado a la carcasa los cuales se encontraron completamente desenroscados (como lo confirman los resultados preliminares de la investigación liderada por NTSB) sueltos dentro de la carcasa exterior, la placa de circuito metálico y la carcasa del LVDT (Transformador diferencial lineal variable). Esto confirmado por las evidencias preliminares proporcionada por la tomografía computarizada.

Como una de las acciones a seguir después de la actividad realizada se les pidió a Honeywell y Leonardo analizar los posibles efectos de los tornillos que se desenroscaron al moverse libremente sobre las terminales de la tarjeta electrónica del actuador lineal y el comportamiento que ocasionan en el helicóptero.

El análisis sobre el efecto que ocasiona un tornillo suelto que toca las terminales de la tarjeta electrónica fue realizado en conjunto por LH y Honeywell.

3.2. Descripción del sistema.

Esta sección proporciona una descripción del sistema integrado de control de vuelo (Integrated Flight Control System) utilizado en los helicópteros Leonardo modelo A109S. El sistema integrado de control de vuelo (IFCS) está compuesto por un sistema helipilot, un sistema de director de vuelo y un medio de acople de los dos sistemas para proporcionar un control automático de la trayectoria de vuelo.

El sistema de control de vuelo integrado proporciona estabilización en los tres ejes de actitud (cabeceo, alabeo y guiñada), y control de trayectoria. Los comandos automáticos del modo de trayectoria son proporcionados por la computadora del director de vuelo, integrando así el sistema de helipilot con el sistema de director/instrumentos de vuelo. Tanto los cálculos de estabilización como de trayectoria de vuelo están programados en todo el régimen de vuelo del helicóptero para un rendimiento óptimo.

El sistema de helipilot proporciona estabilidad y control a través de tres tipos de operación: (1) aumento de estabilidad (SAS), (2) retención de actitud (ATT) y (3) control automático de la trayectoria



de vuelo cuando está en modo acoplado (CPL). El director de vuelo realiza todos los cálculos de comando de la ruta del vuelo.

Las entradas a la computadora desde el sensor de altitud, el sensor de velocidad, la sincronización de posición del colectivo, los giroscopos y radios de navegación, son procesados para proporcionar comandos de cambio de actitud a las computadoras del helipilot y/o al indicador del director de actitud (ADI). Los modos se filtran mediante botones iluminados integrados al selector de modo entre los diversos componentes del sistema que se muestra en la figura 2.1.

El sistema principal de visualización de vuelo (Primary Flight Display System, PFDS) proporciona la visualización de rumbo, curso, radio, actitud de cabeceo y alabeo, velocidad de giro, desviación de rumbo, desviación de pendiente de planeo, indicaciones de ida y vuelta, altitud y velocidad vertical.

Las computadoras del helipilot (HP) proporcionan todos los cálculos para la estabilización de cabeceo, alabeo y guiñada, retención de la actitud y acoplamiento a la computadora del director de vuelo (Flight Director). Además, las computadoras proporcionan las señales necesarias para mover los actuadores lineales de cabeceo, alabeo y guiñada.

Las dos computadoras proporcionan estabilización doble en el eje de alabeo y cabeceo, y estabilización simple en el eje de guiñada. Ambas computadoras son idénticas e intercambiables entre sí. El circuito de guiñada no está presente, en la posición de la computadora No. 2.

Los actuadores lineales son dispositivos de tipo pistón extensible accionados por un motor y se instalan en los eslabones de control de la aeronave en una disposición en serie. Los comandos eléctricos de las computadoras del helipilot impulsan los motores de los actuadores para extender o retraer los eslabones de control que colocan los controles de la aeronave en la maniobra deseada. La retroalimentación de posición al bucle de control de posición (servo loop) del helipilot es proporcionada por un transformador diferencial variable lineal (LDVT). Un freno electromecánico libera el motor para la operación cuando se aplica energía en el acoplamiento del helipilot.

3.3. Análisis de un tornillo suelto que toca las terminales de la tarjeta electrónica.

La investigación del actuador lineal de alabeo del SAS1 (N/P 4012373-909, N/S Ver 3 409) destacó que 2 de los 4 tornillos que mantienen la placa eléctrica de control al cuerpo del actuador, estaban completamente desenroscados y se movían libremente en el exterior entre el cuerpo metálico del actuador y la carcasa del LVDT. La tomografía computarizada confirmó este resultado.

El equipo de investigación solicitó al fabricante del Actuador Lineal (Honeywell) y al fabricante del helicóptero (LH) que realizaran un estudio de un posible contacto entre uno de los dos tornillos y una de las terminales de la tarjeta electrónica.

El estudio del contacto del tornillo suelto con una terminal de la tarjeta se realizó en dos pasos:

1. Honeywell analizó el impacto en el comportamiento del Actuador Lineal (por ejemplo, entrada a la computadora Helipilot)
2. LH analizó el impacto del comportamiento del actuador lineal en la computadora/helicóptero Helipilot

3.4. Análisis del comportamiento del helipilot.

El primer paso consistió en una revisión analítica de esquemas y dibujos con el objetivo de completar el estudio general mediante la realización de pruebas específicas en un actuador lineal.

Una vez que el plan fue identificado, se llevó a cabo el experimento, se utilizó equipo necesario para evaluar el comportamiento de la posición del control loop del actuador lineal en caso de falla.



Las nueve condiciones identificadas por Honeywell como representativas de todos los posibles cortocircuitos en las terminales de la placa electrónica son:

Condición N°1: Falla por un posible contacto entre la terminal 1 y tierra en la tarjeta electrónica del actuador.

Esta condición se simuló al reproducir un cortocircuito entre la terminal 17 del Helipilot y Tierra.

Resultado: El actuador lineal permanece en la posición inicial

Nota: una vez que se elimina el cortocircuito, el actuador lineal es completamente operable y controlable

Condición N°2: falla de un posible contacto entre la terminal 1 y la terminal 2 en la tarjeta electrónica del actuador.

Se simuló al reproducir un cortocircuito entre la terminal N°16 y N°17 del Helipilot.

Resultado: el actuador lineal se extiende y alcanza su carrera de desplazamiento completa en menos de 1 segundo.

Condición N°3: falla de un posible contacto entre la terminal 2 y tierra en la tarjeta electrónica del actuador.

Se simuló al reproducir un cortocircuito entre la terminal 16 del Helipilot y Tierra.

Resultado: el actuador lineal permanece en su posición inicial.

Nota: una vez que se elimina el cortocircuito, el actuador lineal es completamente operativo y controlable

Condiciones N°4: falla de un posible contacto entre la terminal 9 y tierra en la tarjeta electrónica del actuador.

Esta condición no tiene efecto a nivel sistema porque el retorno de excitación de 26 VAC está conectado a tierra del helicóptero.

Condición N°5: falla de un posible contacto entre la terminal 9 y la terminal 10 en la tarjeta electrónica del actuador.

Se simuló reproduciendo la pérdida de voltaje de 26 VAC entre el conector externo del actuador lineal Pin U y V (es decir, el voltaje entre los terminales U y V igual a 0V).

Resultado: la pérdida de 26 VCA provocó el desenganche del SAS afectado y la activación del freno de actuador lineal.

Condiciones N°6: falla de un posible contacto entre la terminal 10 y tierra en la tarjeta electrónica del actuador.

Se ha simulado reproduciendo la pérdida de voltaje de 26 VAC en el conector U del conector externo del actuador lineal (es decir, un voltaje entre las terminales U y V igual a 0 V).

Resultado: la pérdida de 26 VCA provocó el desenganche del SAS afectado y la activación del freno de actuador lineal

Condiciones N°7, 8, 9: falla de un posible contacto entre:

1. Terminal 4 (C1 +) y tierra en la placa de terminales del actuador
2. Terminal 8 (C2 +) y tierra en la placa de terminales del actuador
3. Terminal 4 (C1 +) y terminal 5 (C2 +) en la placa de terminales del actuador

Estas condiciones causan un daño permanente en los circuitos del Helipilot utilizado para conducir el motor (DC) del Actuador Lineal. Por esta razón, no se realizó la evaluación experimental.



A nivel de sistema, el daño en los circuitos del Helipilot resulta en pérdida de voltaje al DC-Motor del Actuador Lineal, por lo tanto, en la posición del eje del actuador se congela.

Se analizaron los modos de falla inducidos por cortocircuitos en la tarjeta electrónica del actuador lineal. Siempre que fue posible sin causar daños a los componentes del sistema y/o elementos de configuración de prueba, se realizó la evaluación experimental. Los resultados del análisis y las pruebas experimentales destacaron que pocos modos de falla dan como resultado la pérdida de la capacidad de Helipilot para controlar el actuador lineal con falla (es decir, hardover) o la desconexión del sistema de control de vuelo integrado (IFCS) (canal afectado).

3.5. Evaluación de impacto a nivel del sistema.

Los actuadores lineales del helicóptero fueron sometidos a una actividad de investigación completa:

1. De acuerdo con los resultados preliminares de la tomografía computarizada, se tomó la decisión de realizar el desensamble completo de los actuadores lineales la cual se realizó en las instalaciones de Honeywell en Boyne City. Esta actividad destacó la pérdida de dos tornillos de tarjeta electrónica del actuador lineal de alabeo de SAS1.
2. Honeywell y Leonardo realizaron un estudio de dos pasos sobre el efecto de un tornillo suelto que toca los pasadores en la placa de terminales: el peor escenario de resultado del análisis es una posible permanencia de la falla del actuador lineal. La desconexión del sistema de control de vuelo integrado (canal afectado) también es posible

3.6. Evaluación de impacto a nivel helicóptero.

Como se verificó en el marco de certificación del helicóptero A109S, ninguno de los efectos de nivel de sistema identificados anteriormente da como resultado, por sí solo, una pérdida de control en vuelo.

Sin embargo, a partir de las evidencias recopiladas durante la investigación, se confirma que un SAS fue declarado inoperativo (luego de realizar la actividad del aislamiento de la falla de acuerdo con las instrucciones proporcionadas en el Manual de Mantenimiento del helicóptero) considerándose necesaria una evaluación adicional.

Se aplican las siguientes consideraciones de hecho:

En caso de que un SAS se declare no operativo, la Lista de equipos mínimos del operador establece las condiciones de despacho [incluidas las limitaciones del Manual de vuelo (RFM)].

Solamente vuelos en condiciones VFR deben planificarse y realizarse el vuelo atento (velocidad indicada de hasta 128 nudos y/o velocidad de ascenso 1,000 pies/min, volar por encima de 500 pies sobre el terreno) o manualmente en todas las demás condiciones.

Por lo tanto, si solo se aplican las limitaciones de RFM (Manual de vuelo) con respecto a un Helipilot operativo, la desconexión del Helipilot o el actuador Lineal de alabeo en "hardover" no pueden resultar en una pérdida de control en el vuelo del Helicóptero.

3.7. Conclusiones.

Se han analizado los modos de falla inducidos por cortocircuitos dentro de la tarjeta electrónica del actuador lineal. Siempre que sea posible sin daños a los componentes del sistema y/o elementos de configuración de prueba, se ha realizado una evaluación experimental.

Los resultados del análisis y pruebas experimentales destacaron que pocos modos de falla dan como resultado la pérdida de la capacidad del helipilot para controlar el actuador lineal que presenta la falla (es decir, "hardover") o la desconexión del sistema AFCS.



4. Reporte de hechos de la inspección al cuerpo del actuador lineal de roll (alabeo) de SASI.

El grupo de investigadores (NTSB, EASA y DGAC) y expertos del fabricante (Leonardo Helicopters y Honeywell), al término de la reunión sostenida en las instalaciones de Honeywell en Boyne City, Michigan, del 23 al 24 de julio de 2019, hicieron la recomendación de realizar un análisis al cuerpo del actuador lineal de alabeo del SASI, para conocer el motivo por el que se encontraron sueltos los dos tornillos en el interior del actuador, los resultados son los siguientes:

4.1. Carcasa del actuador lineal de SASI, tarjeta electrónica y tornillos de montaje, espaciadores y arandelas de seguridad.

El 10 de diciembre de 2019, el laboratorio de materiales de la NTSB realizó el reporte No. 19-067 donde documento la naturaleza de los tornillos sueltos que se encontraron durante el desensamble del actuador lineal de alabeo del SASI; la tarjeta electrónica se encontró fija en su lugar con dos tornillos instalados en el lado 2 del cuerpo del actuador. Un espaciador estaba presente entre la tarjeta electrónica y el cuerpo del actuador, así como las arandelas de seguridad presentes debajo de cada cabeza de tornillo.

Durante el desensamble del actuador lineal de alabeo del SASI se observó que no estaban instalados los tornillos en el lado 1, es más un tornillo del lado 1 estaba suelto en la cavidad frontal de la carcasa del actuador 1 y el otro tornillo salió del cuerpo del actuador y cayó al suelo durante el desensamble. Aunque en las imágenes de CT Scan se observó una arandela del lado 1, no se logró recuperar ninguna de las arandelas de seguridad del lado 1. Las roscas de los tornillos del lado 1 estaban cubiertas uniformemente con partículas y desechos, lo que concuerda con estar flojo dentro de la cavidad del cuerpo del actuador. En contraste, las roscas de los tornillos laterales 2 estaban en gran parte limpias y libres de partículas y desechos, lo que es consistente con haber sido roscado y fijado en sus respectivos agujeros. Las cabezas de los tornillos están documentadas no muestran daños. El espaciador del lado 1 está documentado en la figura 4.1.c. y 4.1.d.

Los tornillos de aseguramiento son de acero, cabeza plana tipo Phillips con 1-72 roscas UNF². La longitud de agarre es de aproximadamente 0.173 pulgadas, medido con un calibrador de caratula, la tarjeta electrónica tiene un grosor de aproximadamente 0.038, el espaciador tiene un grosor de aproximadamente 0.062 y la arandela tiene un grosor de aproximadamente 0.020. El grosor combinado de la placa de circuito, la arandela de seguridad y el separador es de aproximadamente 0.120 pulgadas.

Las imágenes de microscopio digital de los lados superior e inferior de la placa electrónica muestran que los tornillos y arandelas estuvieron instaladas. Los orificios del montaje están etiquetados de acuerdo con la orientación del ensamblaje. Las imágenes de microscopio con acercamiento a los orificios de montaje del lado 1 se muestran en las Figuras 4.1.e. Las marcas en el lado superior de la placa de circuito son consistentes con las marcas de impresión creadas por el contacto de compresión entre las arandelas de seguridad debajo de las cabezas de los tornillos.

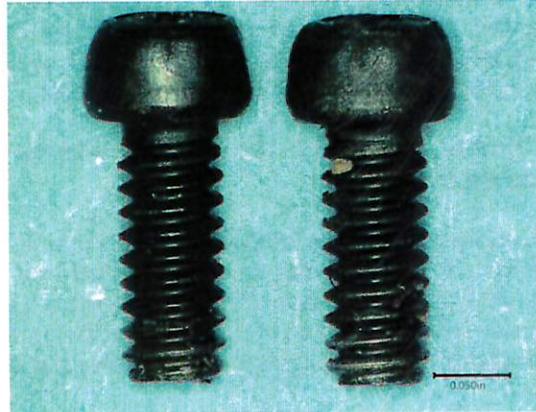
La imagen digital de microscopio del área de montaje de la tarjeta electrónica en la carcasa frontal del actuador 1; los orificios de montaje roscados tienen letras para fines de identificación de acuerdo con la Figura 4.1.d. En las Figuras 4.1.e se muestra una vista más cercana de arriba hacia abajo de los orificios de montaje. Se observó una rebaba en el orificio lateral de 1A. Las vistas de ángulo oblicuo de mayor aumento de cada orificio de montaje. Como se revela en las imágenes, las roscas de los dos

² Estándar de rosca unificado, en inglés, (Unified Thread Standard), define una forma de rosca estándar y la serie, junto con asignaciones, precisiones y designaciones- para los tornillos rosca comúnmente usados en EEUU y Canadá.

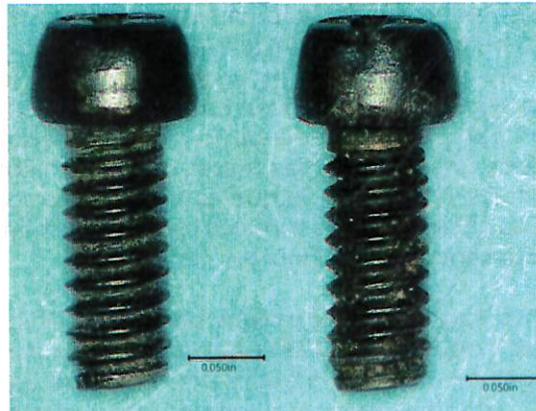


primeros de los orificios del actuador laterales 1A y B se aprecian cortadas. Las roscas en los agujeros de montaje laterales 2A y B están completamente formadas.

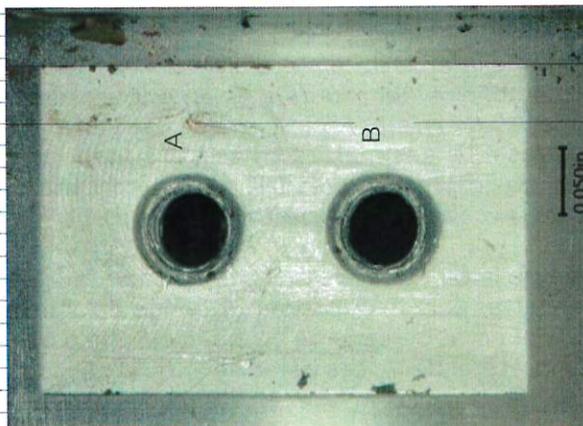
Para fines de documentación, se localizaron muestras de los residuos metálicos observados en el tornillo de bola.



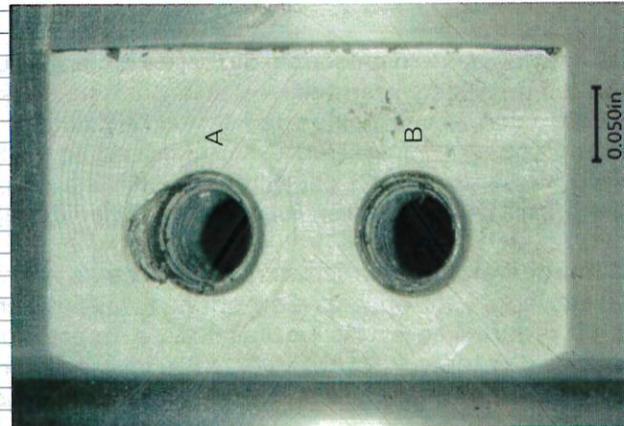
4.1.a. Imagen digital microscópica de los tornillos retirados del lado 2



4.1.b Imagen digital microscópica de los tornillos retirados del lado 1



4.1.c. Lado 2 del cuerpo del actuador (ver 4.1.b.)



4.1.d. Lado 1 del cuerpo del actuador (ver 4.1.b.)



4.1.e. Imágenes de los orificios de montaje de la tarjeta electrónica lado 1

