

Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO CAUSA DE AVERIA EN REDUCTOR
MOTOR PRINCIPAL

Para acceder al Título de Máster Universitario en

TECNOLOGIAS MARINAS Y DE MANTENIMIENTO

Autor: Francisco Rodríguez Bárcena

Tutor: Rubén González Rodríguez

Mayo - 2018

INDICE

Introducción	2
1 Descripción general	3
1.1 Descripción general de buque	3
1.2 Datos del reductor	3
1.3 Sistema hidráulico	3
1.4 Plan de mantenimiento	5
1.5 Principales parámetros de control del reductor en funcionamiento	7
1.6 Planos del reductor	8
2 Descripción de la avería del reductor	12
2.1 Antecedentes	12
2.2 Inspección visual	13
2.3 Acciones recomendadas por el fabricante tras inspección de equipo	18
2.4 Acciones provisionales	18
3 Reparaciones realizadas	19
3.1 Reparación caja reductora	19
3.2 Reparación equipos afectados anexos	22
3.2.1 Revisión y reparación sistema CPP	22
3.2.2 Revisión y reparación acoplamiento elástico	25
4 Análisis de avería	27
4.1 Fallos en reductora	27
4.2 Lubricación, recomendaciones del fabricante para el uso de aceite lubricante	29
4.3 Métodos de prueba para influencias relacionadas con el lubricante en la capacidad de carga (FZG-TEST)	30
5 Conclusiones	32
6 Bibliografía	35

INTRODUCCION

El objeto de este trabajo es el estudio sobre una avería real de una caja reductora de un buque gasero.

En el capítulo 1 se hace una brevísima descripción del buque para a continuación de forma más detallada, ver las características principales del equipo reductor, su sistema hidráulico, plan de mantenimiento y los planos referenciales a lo largo de todo el trabajo.

En el capítulo 2 se hace una descripción de la avería del reductor, con unos antecedentes, inspecciones y las acciones recomendadas y realizadas. Con la información de que se dispone se verá de forma clara en este capítulo la misma.

En el capítulo 3 vemos las reparaciones realizadas y los efectos en otros equipos que la avería en la caja reductora tuvo, dejando ver la posibilidad de que esta se produce a causa de otro equipo del buque.

En el capítulo 4 veremos los fallos en el equipo reductor y la influencia del lubricante en el análisis de la avería.

Las conclusiones se desarrollan en el capítulo 5. Para llegar a esas conclusiones se analizarán los elementos implicados en la avería, tanto técnicos como humanos.

1 DESCRIPCION GENERAL

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BUQUE

Tipo buque: Gasero

Bandera: Brasil

Fecha de construcción: 19/05/2000

GT: 6546

Peso muerto: 7912

Eslora: 114m

Manga: 17.6m

Puntal: 9.8m

Tipo de propulsión: 1 Diesel MAK 8M32, 600rpm, 3840 kw

Propulsión: 1 hélice de paso variable LB10 BERG, 152 rpm

Velocidad: 15.2 kn

Instalación eléctrica: 1 generador de cola 1650 KVA, 450V, 60Hz, 3 generadores diesel 523 KVA, 450V, 60 Hz

1.2 DATOS DEL REDUCTOR

Fabricante: Reintjes

Type: LAF 6645 K41

Reducción: 3.955:1

Dirección de rotación:

Entrada: Horario

Salida: Anti horario

Fecha de construcción del equipo: 1998

Fecha de inicio de trabajo: Inicios de 2001.

Horas de funcionamiento: 35.358 horas a 02/06/2012.

1.3 SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico comprende una bomba de engranajes, un filtro de aceite, intercambiador de calor, válvula de limitación de presión, válvula de control, sistema de aceite a presión con retardo de maniobra de embrague y sistema de lubricación.

El aceite suministrado por la bomba se filtra y se enfría. El intercambiador de calor asegura que la temperatura del aceite no sube por encima de la temperatura de funcionamiento normal.

El aceite circula alrededor del haz de tubos, y el agua de refrigeración fluye a través del haz de tubos.

La presión de aceite está regulada a la presión de funcionamiento en la válvula limitadora de presión. La presión de funcionamiento normal es aprox. 16 - 20 bar (1600 - 2000 kPa o 232 - 290 psi).

Con la válvula de control en la posición PARADA (posición neutral), el aceite que se desborda de la válvula de limitación de presión se utiliza para la refrigeración de las láminas y para la lubricación de todos los puntos de apoyo y de los dientes de los engranajes.

Si la válvula de control se acciona a la posición EMBRAGADO, el aceite a presión está fluyendo desde la válvula de control al embrague y la válvula de presurización, el exceso de aceite se usa para lubricación.

Si la presión de aceite excede la presión ajustada de fábrica en la válvula de compensación, esta válvula se abre y conduce una parte del flujo de aceite del embrague a la cazoleta de retardo de la maniobra. Al llenar el recipiente de retardos, la presión en el sistema de aceite aumenta hasta la presión de funcionamiento ajustada y el embrague entra en arrastre de fuerza.

Al cambiar la válvula de control a la posición de DESEMBRAGADO, se interrumpe la presión de aceite al embrague y se desconectará, el aceite sale del embrague a través del canal de retorno al carter de aceite.

El sistema de retardo de acoplamiento permite una maniobra blanda de los embragues teniendo en consideración el momento de inercia de la hélice

La válvula de presurización está configurada de fábrica y normalmente no requerirá ajuste. [1]

1.4 PLAN DE MANTENIMIENTO

En el plan de mantenimiento previsto por REINTJES están resumidos los trabajos necesarios y subdivididos en etapas de mantenimiento.

Se especifica por parte del fabricante que en caso de condiciones especiales puede resultar necesaria una modificación de este plan.

Etapa de mantenimiento 1, cada día con el motor parado

- Controlar nivel aceite.

Etapa de mantenimiento 2, cada día con el motor en marcha, controlar:

- Presión de servicio.
- Temperatura de aceite.
- Temperatura de agua de refrigeración.
- Indicación de suciedad del filtro doble conmutable.
- Verificación visual y ruidos en marcha.

Etapa de mantenimiento 3, por primera vez después de 300 horas de servicio

- Primer control de aceite.
- Renovar los elementos del filtro.
- Controlar uniones atornilladas incluido fundamento, conexiones del motor y hélice como también los tornillos de la carcasa intermedia
- Tuercas de unión y tornillos huecos se volverán a atornillar en caso de estar mal ajustados
- Controlar la permeabilidad del intercambiador de calor

Etapa de mantenimiento 4, después de cada 3000 horas de servicio o 6 meses

- Cambio de aceite
- Renovar elementos del filtro

Etapa de mantenimiento 5, después de cada 6000 horas o 1 año

- Controlar uniones atornilladas incluido fundamento, conexiones del motor y hélice como también los tornillos de la carcasa intermedia
- Controlar la permeabilidad del intercambiador de calor, y en caso necesario cambiar las empaquetaduras

Etapa de mantenimiento 6, después de cada 60000 horas de servicio o 10 años o en conjunto con revisión a fondo Motor Principal

Controlar:

- De los ejes con respecto al giro redondo,
- De los asientos de cojinete en cuanto a daños
- Los arrastres
- La rueda y los dentados de piñón
- Las espigas de pistón anular
- Los distribuidores de aceite
- Los manómetros

Renovar:

- Las láminas de embrague
- Los anillos rectangulares,
- Los tornillos y los muelles recuperadores del pistón anular
- Los anillos obturadores toroidales
- Los anillos de seguridad
- Todos los tornillos de la caja del embrague
- Rodamientos
- Tornillos y muelles del cojinete de empuje
- Anillos y manguitos de junta del eje
- Elementos filtrantes y juntas
- Bomba de aceite
- Juntas tapas observación
- Juntas válvulas de control y limitadora de presión
- Tubos flexibles
- Limpieza completa de la reductora. [1]

1.5 PRINCIPALES PARAMETROS DE CONTROL DEL REDUCTOR EN FUNCIONAMIENTO

Presión de aceite

- La presión de trabajo máxima debe estar entre los 16-20 bar, con número de revoluciones a plena carga del motor, temperatura de trabajo y embragado.

Temperatura de aceite

- Temperatura normal de servicio debe ser de aproximadamente 60-70 °C

Temperatura agua refrigeradora

- Debería de haber entre la entrada y salida de agua del refrigerador una diferencia de entre 3 y 5 °C. Un aumento de la diferencia de temperatura indica ensuciamiento en el lado de agua del refrigerador o una cantidad de agua pequeña.

Indicación de ensuciamiento del filtro

- En caso de una alta viscosidad de aceite o al estar frío el aceite en la fase de arranque, la presión diferencial es mayor pudiendo producirse transitoriamente una alarma errónea. Si se produce la alarma se rearma la indicación óptica, si esta se produce de nuevo inmediatamente el elemento filtrante se está ensuciando

Verificación visual y ruidos en marcha

- Comprobación de fugas y piezas flojas, poniendo atención a los ruidos de servicio usuales. Las variaciones pueden ser un indicio de defectos o errores. [1]

1.6 PLANOS REDUCTOR

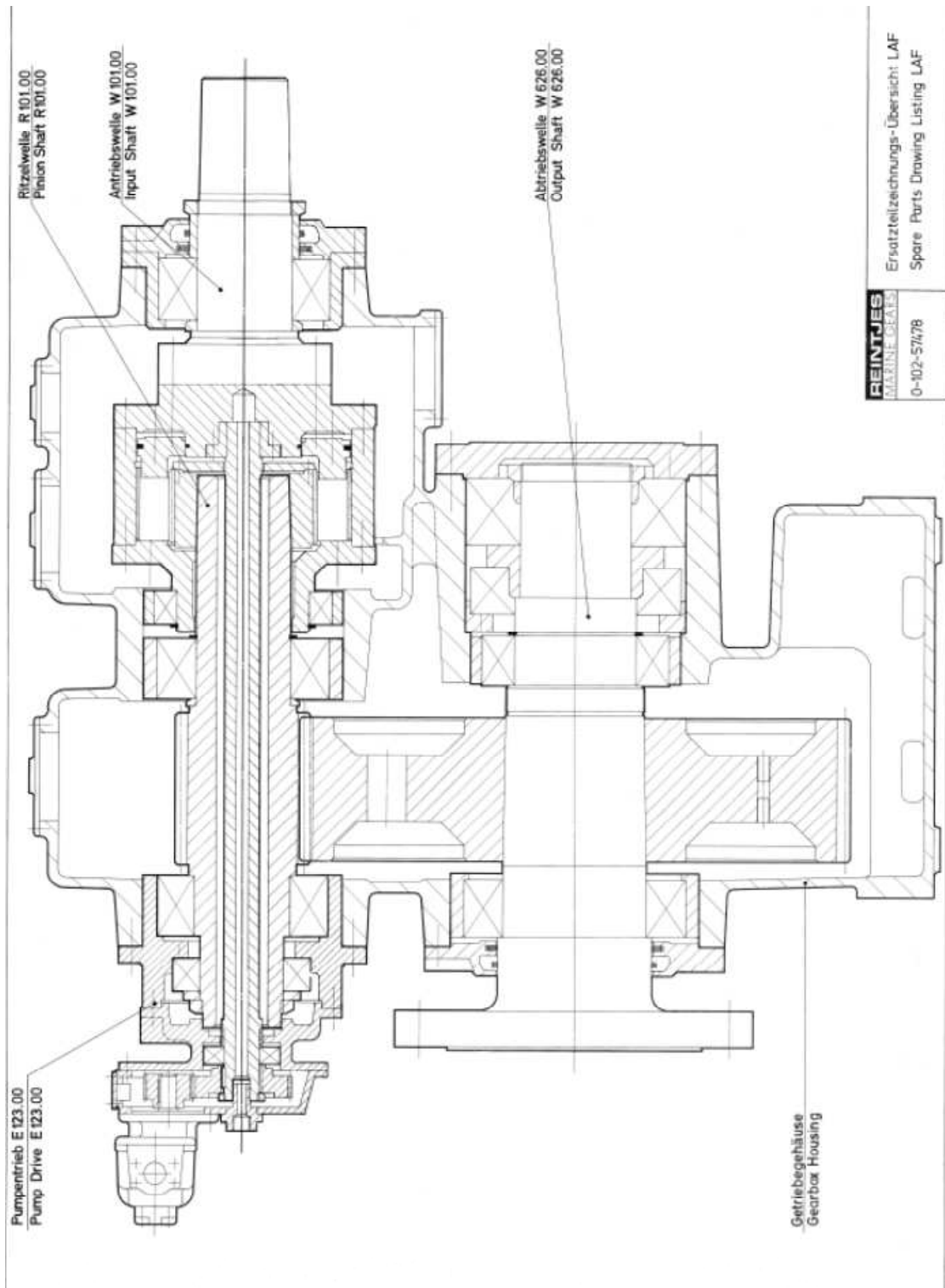


Imagen 1. Conjunto. Fuente [1]

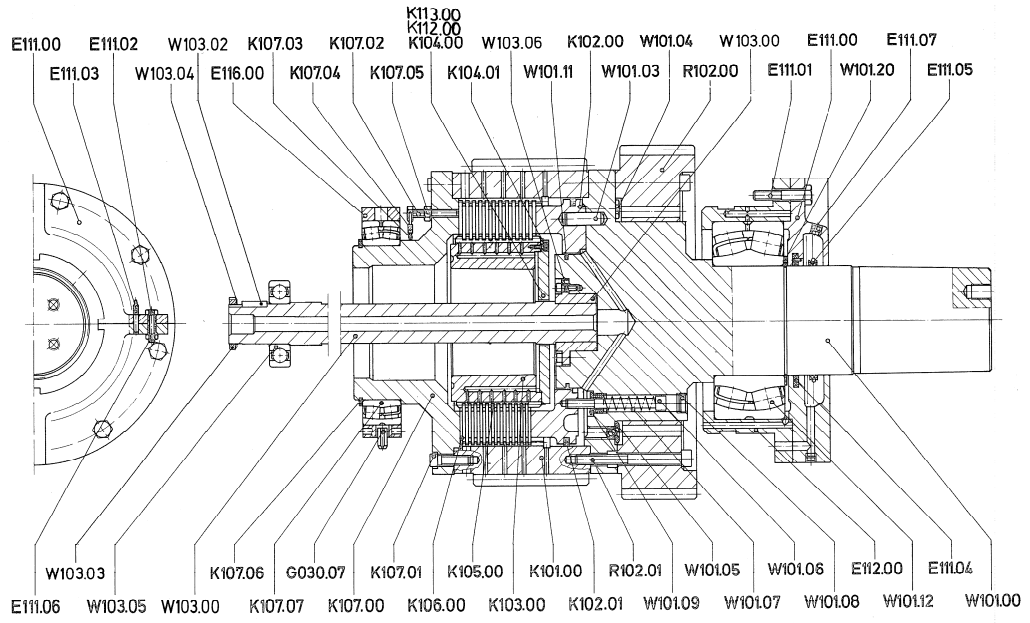


Imagen 2. Eje de entrada. Fuente [1]

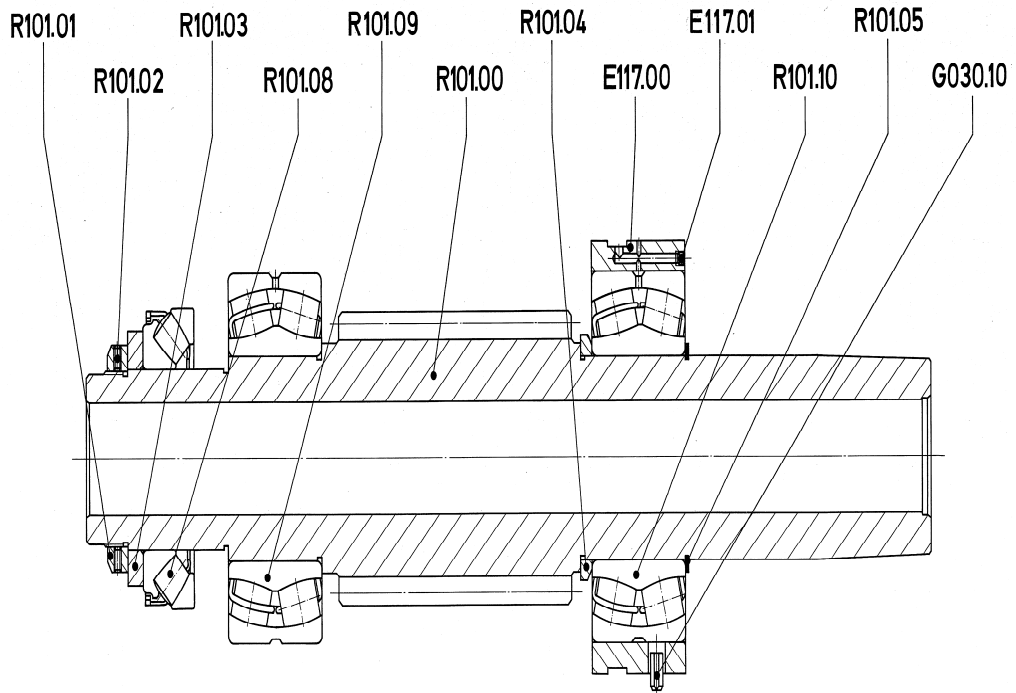
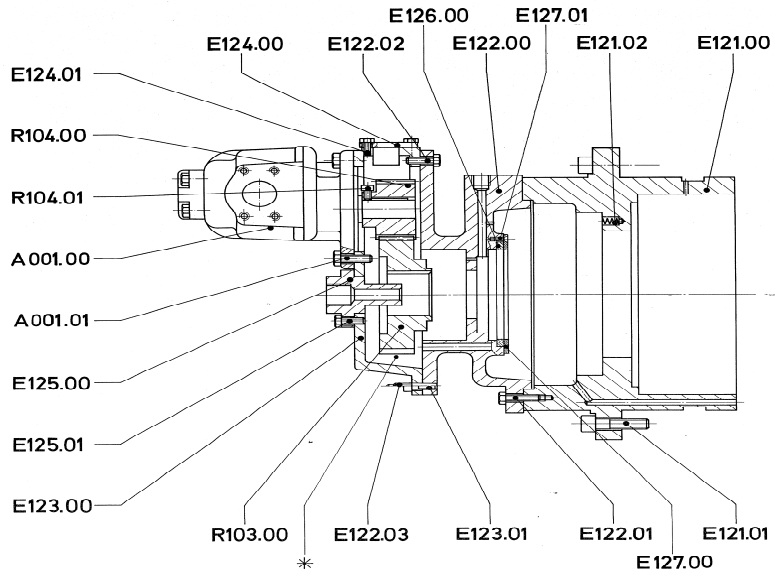


Imagen 3. Eje piñón. Fuente [1]



* Doppelter Pumpenrieb mit zusätzlichem Pumpenrad R108.00 und Gewindestift R108.01
 * TWIN-PUMP-DRIVE WITH ADDITIONAL WHEEL R108.00 AND THREADED PIN R108.01

Imagen 4. Bomba acoplada. Fuente [1]

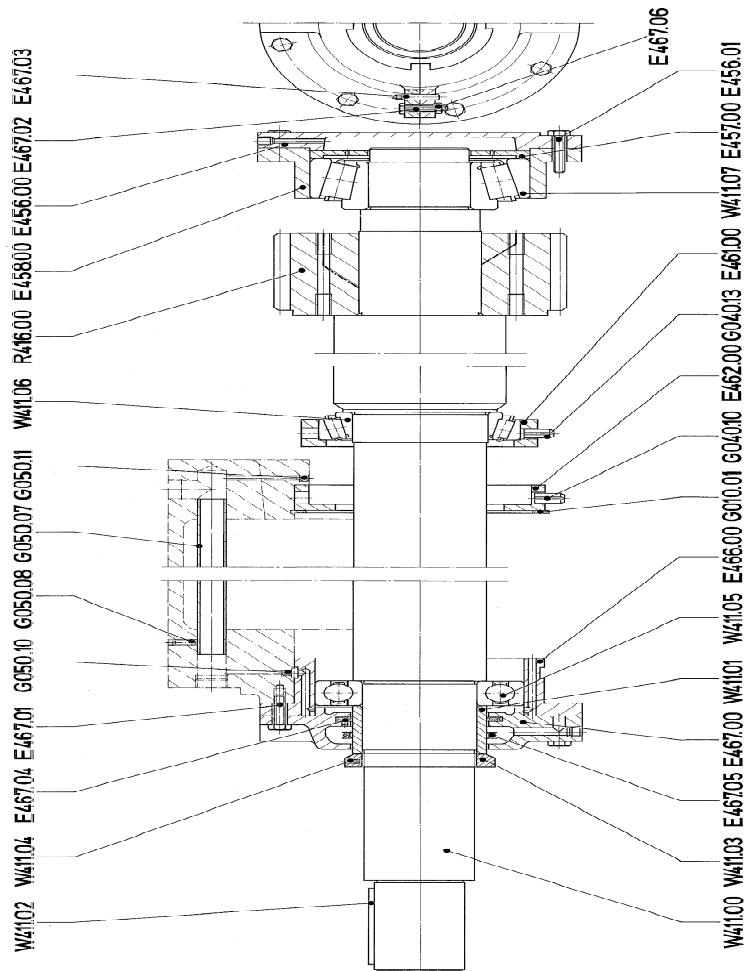


Imagen 5. Eje toma fuerza (PTO). Fuente [1]

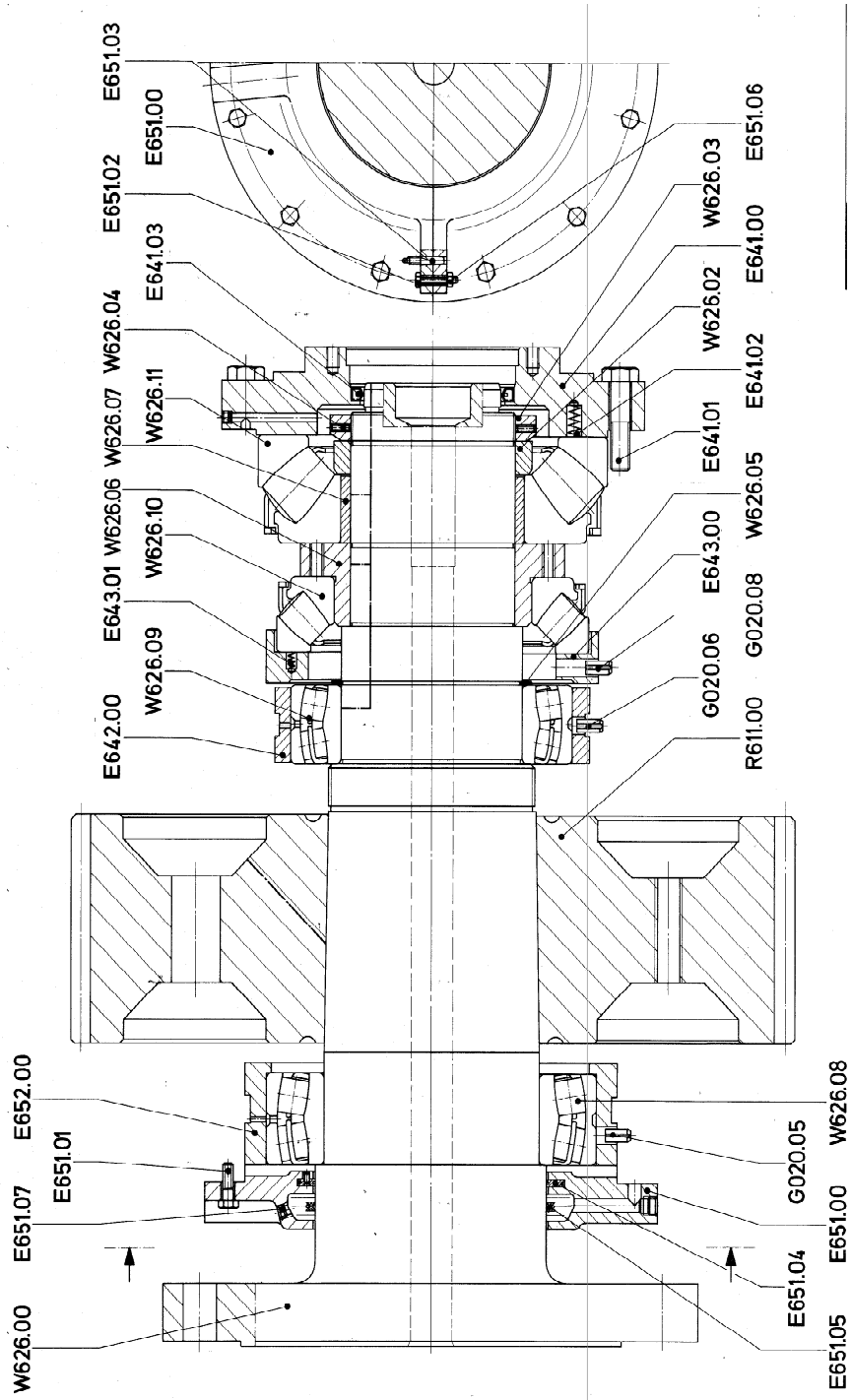


Imagen 6. Eje de salida. Fuente [1]

2. DESCRIPCIÓN AVERÍA EN REDUCTOR

2.1 ANTECEDENTES

Durante la varada de 2010 se realizó inspección visual de la caja, no encontrando ningún tipo de anomalía.

NOTA: Tras inspección visual, funcional y revisión de los resultados de las muestras de aceite. Teniendo el motor menos de 30.000 horas de funcionamiento, se decide posponer le mantenimiento programado. Téngase en cuenta que el overhaul completo se tendría que realizar a las 60000 horas, muy por debajo de estas o 10 años, este otro parámetro aunque no cumplido si está muy cercano.

- La tripulación informa que los filtros de aceite, estaban muy tupidos sobre el mes de noviembre de 2010.
- Para mejorar el filtraje se realizan constantes limpiezas de los filtros, posiblemente con un producto no adecuado (diesel o descarbonizante).
- Desde 07/2010 hasta 20/04/2012 los resultados de las muestras de aceite presentan las siguientes anomalías:

AGUA: Aparecen tres muestras con restos de agua en cantidades muy pequeñas, probablemente condensación o contaminación de la muestra.

- Pequeña presencia de agua $<0,05$ en 01/01/2011, la viscosidad no se ve afectada. En la siguiente muestra desaparece, No hay registro de cambio de aceite.
- Presencia de agua 0,2 m fecha 01/03/2011, la viscosidad no se ve afectada. En la siguiente muestra desaparece. No hay registro de cambio de aceite.
- Presencia de agua $<0,05$ fecha 28/04/2011, la viscosidad no se ve afectada. En la siguiente muestra desaparece. No hay registro de cambio de aceite.
- Presencia de agua $<0,05$ fecha 28/12/2011, la viscosidad no se ve afectada. En la siguiente muestra desaparece. No hay registro de cambio de aceite.

HIERRO: Continuo aumento de la cantidad de Hierro desde 2011. Concentraciones tres veces superior, a lo esperado en últimos análisis de 2012.

COBRE: Aumento paulatino de la cantidad de Cobre desde 2011.

En estas fechas el reductor ya tenía más de 10 años de funcionamiento.

2.2 INSPECCIÓN VISUAL

En inspección completa de la caja reductora entre mayo y junio de 2012 se observan las siguientes incidencias:

- Oxidación superficial en todas las superficies de ejes y engranajes de la caja.



Imagen 7. Marcas de oxidación. Fuente [2]

- Posible contaminación de aceite: Apariencia en parado normal, pero en funcionamiento el aceite excesivamente espumante.



Imagen 8. Circulación de aceite. Fuente [2]

- Daños en el piñón del eje de entrada. Pérdida de material de un 75 % de un diente



Imagen 9. Diente piñón eje entrada. Fuente [2]

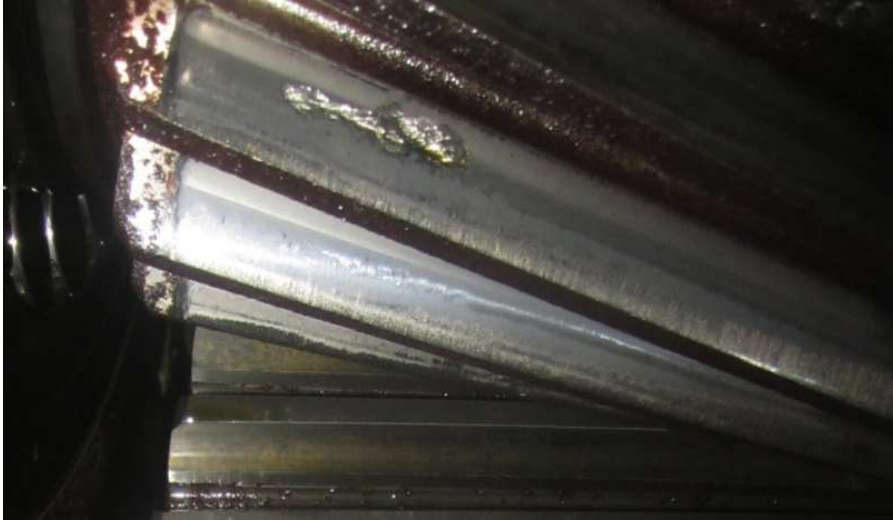


Imagen 10. Pitting diente engranaje eje entrada. Fuente [2]

- Daños en el engranaje de salida de la caja. Los dientes del engranaje muestran desgaste excesivo (wear)



Imagen 11. Engranaje de salida. Fuente [2]

- Superficies de las ruedas dentadas de entrada del eje de potencia que transmite movimiento a la PTO con marcas de oxidación superficiales.



Imagen 12. Superficie en los dientes de la rueda dentada eje de entrada transmisora de movimiento al eje de la PTO. Fuente [2]

- Cojinete eje de entrada Intermedio: Perdida de material rodillos y superficie de rodadura.



Imagen 13. Vista interior del rodillo y pista cojinete. Fuente [2]

- Cojinete eje de entrada Popa: Perdida de material rodillos y superficie de rodadura.



Imagen 14. Vista interior del rodillo y pista cojinete. Fuente [2]

- Cojinete eje de Salida Proa: Pequeñas marcas en rodillos y superficie de rodadura.



Imagen 15. Vista interior del rodillo y pista cojinete. Fuente [2]

- Cojinete eje de salida Popa: Perdida de material rodillos y superficie de rodadura.



Imagen 16. Vista interior del rodillo. Fuente [2]

- Perdidas de aceite por conexiones, que obliga a rellenar continuamente la caja.
- Fallo de los sensores de presión diferencial de los dos filtros del sistema: Sistema de caja reductora, y sistema de hélice de paso variable. Registro de la incidencia 29/2/2012.
- El juego axial no pudo ser verificado.
- Los filtros se limpiaron poco antes de la inspección y no presentan gran contaminación.

2.3 ACCIONES RECOMENDADAS POR FABICANTE DE EQUIPO TRAS INSPECCIÓN

El fabricante del equipo recomienda ante la inspección realizada la toma de las siguientes medidas:

- Cambiar el aceite de la caja reductora por posible contaminación.
- Realizar reparación completa del equipo.
- Cambiar el piñón dañado.
- Enviar a mecanizar el resto de ruedas a Reintjes Alemania para su posible recuperación.

2.4 ACCIONES PROVISIONALES

Ante la imposibilidad de realizar la reparación inmediatamente después de la inspección llevada a cabo, la dirección técnica de la empresa decide realizar lo siguiente:

- Seguimiento continuo de los parámetros de funcionamiento de la Caja reductora, inspección de filtros.
- Instalación de los diferenciales de presión de aceite.
- Tomar muestras de aceite para enviar a analizar.
- Cambio de aceite de la caja.
- Pedido filtros nuevos para su posterior cambio.
- Pedir Aureliza XL 4030, para realizar un nuevo cambio de aceite.
- Preparar flushing del sistema.
- Petición de oferta y plazos de entrega de las piezas necesarias para reparación a Reintjes.
- Petición de asistencia a Berg, para revisión del sistema de hélice de paso variable.

3. REPARACIONES REALIZADAS

Entre octubre y noviembre de 2012 el buque realiza las siguientes reparaciones a flote.

3.1 REPARACION CAJA REDUCTORA

Desmontaje y reparación.

Se desacoplan tuberías de aceite y agua, se desmontan filtros y enfriador, la bomba de aceite acoplada y la de reserva eléctrica y el cableado eléctrico. Se desacoplan Vulcan de eje de entrada y el de toma de fuerza (PTO), a continuación, se desmonta la tapa superior del reductor con el conjunto de la toma de fuerza incorporado. Se desmonta el conjunto de eje de entrada con embrague. Se extraen los pernos de unión de los mangones del eje de salida del reductor con el eje de cola y previo desmontaje de los técnicos del sistema de hélice de paso variable del distribuidor del paso variable, se desmonta el conjunto completo del eje de salida.

En eje de entrada se descala mangón del acoplamiento elástico y se desarma totalmente el conjunto, se limpian y reconocen los despieces. El arrastrador K103.00 presenta fuerte desgaste en la zona de arrastre de los discos, se sustituye por uno nuevo. La rueda del eje piñón R101.00 es la más dañada y se sustituye por una nueva. Los discos del embrague presentan desgaste normal de trabajo. Todos los rodamientos son sustituidos por unos nuevos. Se repasan roces en las piezas sometidas a fricción.

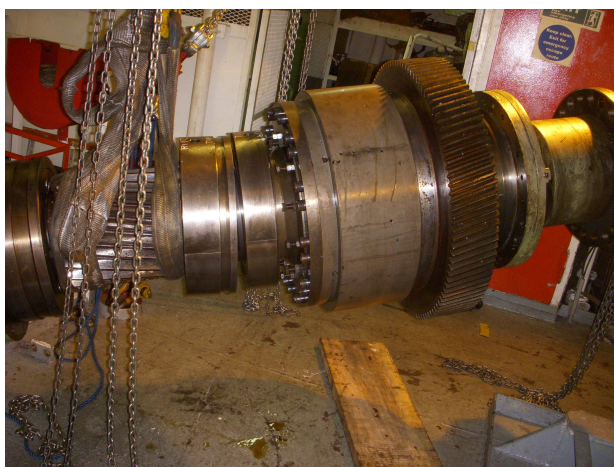


Imagen 17. Conjunto eje entrada. Rotura diente eje piñón R101.00. Fuente [2]



Imagen 18. Eje piñón reparado. Fuente [2]

En eje de salida se descala la rueda R611.00 (ver imagen 11) para el desmontaje del rodamiento de popa y los elementos de obturación. Se verifican los despieces y se repasan los roces de las piezas sometidas a fricción. La rueda R611.00 presenta desgaste excesivo, se rectifica quedando dentro de los valores prescritos por Reintjes. Todos los rodamientos son sustituidos por unos nuevos.

En eje toma de fuerza (PTO), se descala el mangón del acoplamiento elástico y se desarma totalmente el conjunto, se limpian y reconocen los despieces. Se repasan roces de las piezas sometidas a fricción. Todos los rodamientos son sustituidos por unos nuevos.

En bomba de aceite acoplada, se desarma totalmente, se limpian los despieces con productos químicos y se verifican. El distribuidor de aceite E125.00 (ver imagen 19) presenta desgaste acusado siendo necesaria su sustitución. Se repasan los roces de las piezas sometidas a fricción. Se sustituye el juego de juntas, rodamiento y retén por elementos nuevos.



Imagen 19. Distribuidor E125.00 dañado. Fuente [2]

El enfriador de aceite se desarma totalmente y se limpian los despieces, sobre todo el haz tubular y los cabezales para los que se usan procedimientos químicos y varillando el haz tubular. Se repasan roscas y protege envolvente con dos manos de imprimación. Se sustituye juego de juntas, ánodos de zinc y tornillería en mal estado. Se realiza prueba hidráulica en la región de agua (6 bar) y con gasoil en la de aceite (30 bar), con resultado satisfactorio.

La válvula de mando se desarma totalmente, se limpian y verifican los despieces, se repasan las piezas sometidas a fricción y se sustituye el juego de juntas.

Montaje

Se arma de nuevo el reductor en orden inverso al desmontaje. Montando en primer lugar el conjunto de eje de salida, ajustando y verificando que la holgura de los rodamientos

axiales de marcha adelante y atrás quedan según normas Reintjes. Una vez realizada esta comprobación se acopla la línea de ejes, encargándose de esta tarea los técnicos del sistema de hélice de paso variable.

A continuación se monta el paquete de eje de entrada, verificando la holgura axial del eje según normas Reintjes.

Se monta el eje de toma de fuerza (PTO), la tapa superior del reductor, se instalan las bombas de aceite, el enfriador, el bloque hidráulico y el filtro, acoplando tuberías y accesorios correspondientes. Se realizan las conexiones eléctricas y se taran presostatos.

Se acopla con el mismo acoplamiento elástico la toma de fuerza PTO, y al motor, con acoplamientos nuevos por deformaciones en el mismo.

Las medianías de las carcasas se hermetizaron con pasta formadora de juntas.

Se realiza alineación entre motor y caja reductora y entre caja reductora y alternador.

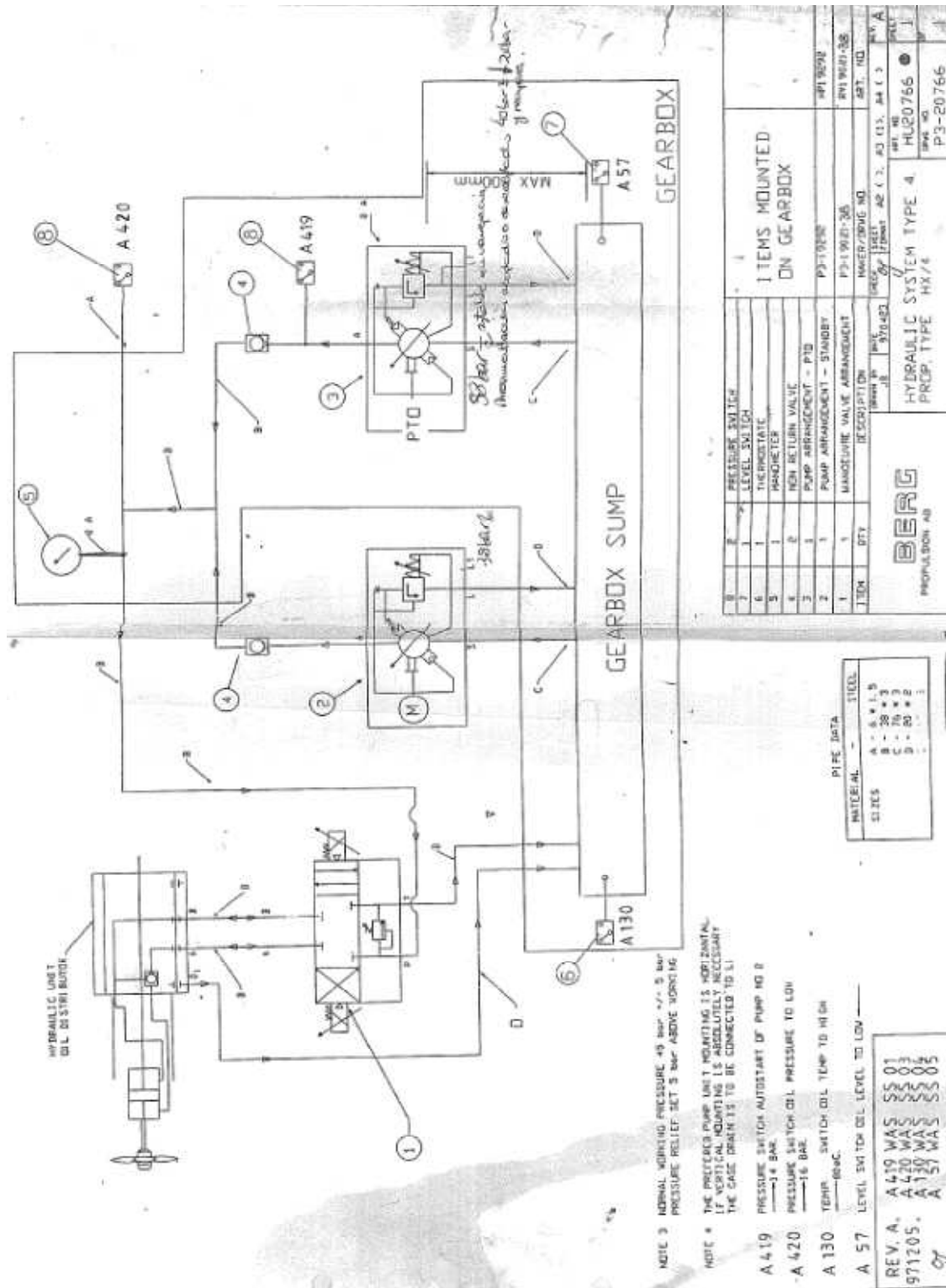
3.2 REPARACION EQUIPOS AFECTADOS ANEXOS

A consecuencia de la avería de la caja reductora, un equipo se vio afectado directamente, el sistema de hélice de paso variable. Por otro lado aunque la causa no es directa, se revisa y encuentran anomalías en el acoplamiento elástico entre la caja reductora y el motor principal.

3.2.1 REVISION Y REPARACION SISTEMA HELICE PASO VARIABLE (CPP)

Durante los trabajos de reparación de la caja reductora se revisa el sistema de hélice de paso variable. Se revisa porque el sistema de lubricación es común a reductora y CPP, y las tuberías de aspiración de aceite están en la parte baja del tanque. Se esperan daños mecánicos internos en CPP y elementos hidráulicos.

Este equipo fue verificado en 2010, no se consideraba ninguna rutina de mantenimiento, ni por las horas de funcionamiento, ni por el tiempo transcurrido en el equipo.



NOTE 3 NORMAL WORKING PRESSURE 49 bar +/- 5 bar
PRESSURE RELIEF SET 5 bar ABOVE WORKING

NOTE 4 THE PRESSURE PUMP UNIT MOUNTING IS HORIZONTAL
IF VERTICAL MOUNTING IS ABSOLUTELY NECESSARY
THE CASE DRAIN IS TO BE CONNECTED TO L1

A 419 PRESSURE SWITCH AUTOSTART OF PUMP NO 2
14 BAR

A 420 PRESSURE SWITCH OIL PRESSURE TO LOW
16 BAR

A 130 TEMP. SWITCH OIL TEMP TO HIGH
60°C

A 57 LEVEL SWITCH OIL LEVEL TO LOW

PIPE DATA

MATERIAL	SIZE	STEEL
A	4 - 6	1 - 9
B	8 - 20	3
C	25 - 30	2
D	35 - 40	1

ITEM NO.	QTY	DESCRIPTION	MAKE/REF NO	ART. NO.
1	1	MANOUPURE VALVE ARRANGEMENT	PS-19021-26	PS19021
2	1	PUMP ARRANGEMENT - STANDBY		
3	1	HIGH RETURN VALVE		
4	1	MANOUPURE VALVE ARRANGEMENT		
5	1	MANOUPURE VALVE ARRANGEMENT		
6	1	TEMPERATURE SWITCH		
7	1	LEVEL SWITCH		
8	1	PRESSURE SWITCH		

ITEMS MOUNTED ON GEARBOX

HYDRAULIC SYSTEM TYPE 4
PROP. TYPE HX/4

REV. A. 971205. A 419 WAS 3301
A 420 WAS 3303
A 130 WAS 3305
A 57 WAS 3305

BEAG
POPULATION AB

REV. NO. HUR0766
DATE NO. P3-20766

Imagen 20. Sistema hidráulico CPP. Fuente [3]

Durante la revisión se encuentran daños mecánicos en superficies de control interno y componentes hidráulicos debido a la contaminación de partículas metálicas de aceite.

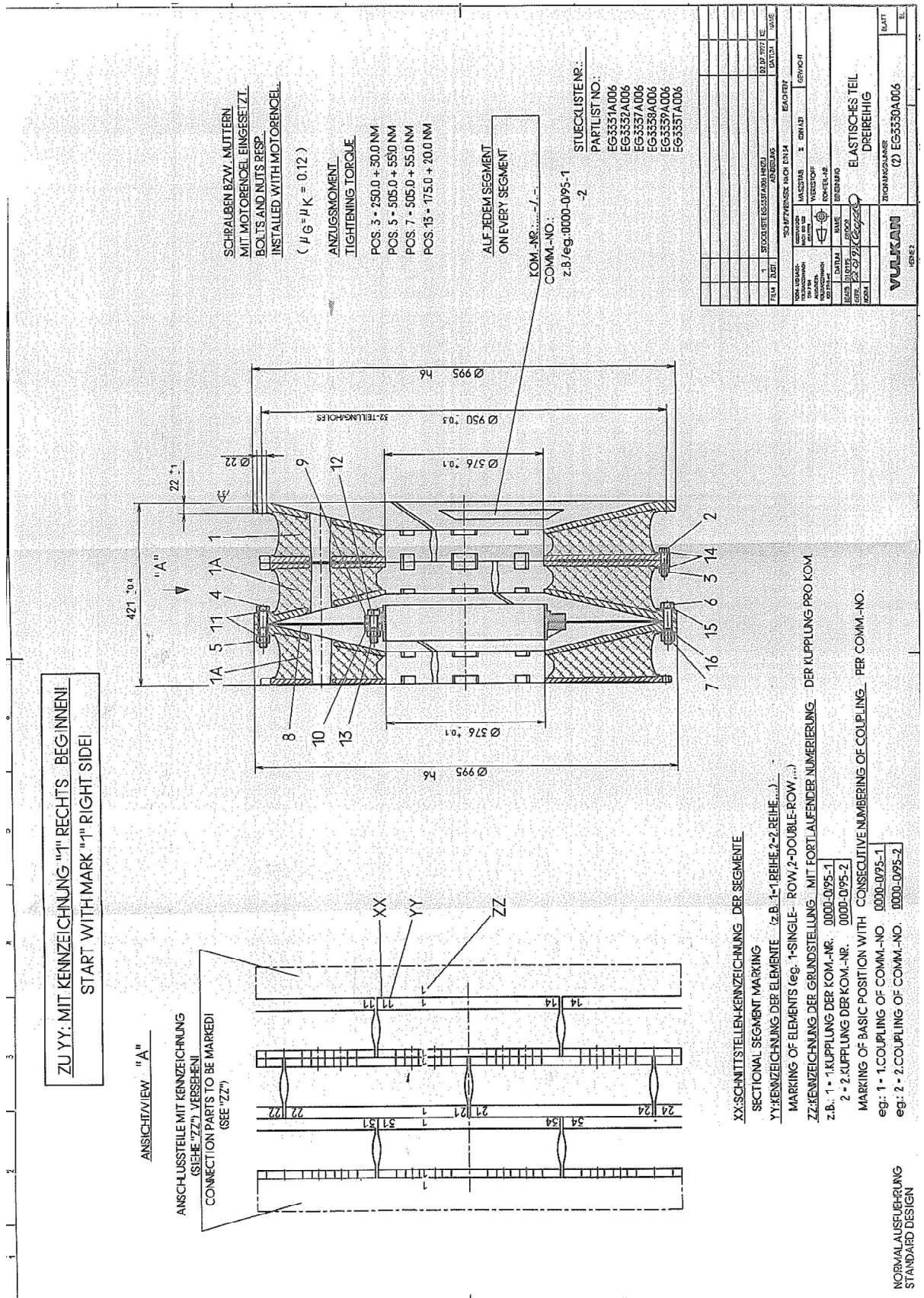
Medidas tomadas:

- Hacer una herramienta para el eje de la hélice y preparar la sala de máquinas para instalarlo. La herramienta es necesaria para las obras a fin de asegurar el no desplazamiento del eje de la hélice principal, comprobar los sellos del eje de la hélice ubicados en la sala de máquinas, y tomar muestras de aceite
- Eje de la hélice desplazado 22 mm a popa y bloqueado en esta posición hasta el final de los trabajos.
- Se libera la tubería interior de la caja de engranajes con el paso todo a popa, tubo interior todavía 20 mm dentro del eje de la caja reductora. Se alcanza el desplazamiento límite del eje de la hélice para poder liberarlo.
- Caja distribuidora de aceite (OD-BOX) desmontada del sistema , enviada a taller, después de revisar las piezas internas, se encuentran daños debido a la contaminación del aceite, se cambian todas las juntas, las partes internas y se realizan trabajos mecánicos para mejorar la superficie de acabado.
- Se desmontan, comprueban y limpian las líneas hidráulicas.
- Revisión bombas hidráulicas, válvula reguladora de presión, bloque de filtros, y válvulas de retención. Se encuentran daños mecánicos en los elementos hidráulicos, sellos resecos, rodamientos con desgaste, resortes de válvulas agarrados y desgastados. Se realiza una reparación completa de todos los elementos. Se verifican equipos para evitar fugas externas e internas y pruebas de presión.
- Después del montaje de todos los componentes, se realiza limpieza del circuito de aceite, se rellena y realiza prueba de fugas.
- Se realiza inspección bajo el agua para asegurar la estanqueidad del sistema.
- El ajuste del sistema se hace en dos fases. En pruebas de mar después de la reparación de la caja reductora y después de 100 horas de funcionamiento del sistema cuando se ha alcanzado el desgaste en las nuevas piezas internas.

3.2.2 REVISION Y REPARACION ACOPLAMIENTO ELASTICO

En revisión durante la reparación de la caja reductora se observa deformación del acoplamiento elástico. Según informe técnico presenta:

- Deformación permanente en 90% de las piezas de caucho analizadas, dejando el caucho rígido, siendo impropio para absorber choques, vibraciones y desalineaciones.
- Se efectúa el cambio de las piezas de caucho, siendo aprovechable anillos externos, cubo, láminas elásticas y tornillos.
- La causa de la deformación puede ser fundamentalmente debida a que la vida útil de las piezas de caucho es de aproximadamente 5 años. Otra causa aunque menos probable es por que trabaje con sobrecarga por tener la hélice acoplada durante el arranque del motor principal, esta última se descarta.
- La fabricación del equipo data de 1997, siendo cambiados los elementos elásticos únicamente en 2004.



ZU YY: MIT KENNZEICHNUNG "1" RECHTS BEGINNEN!
START WITH MARK "1" RIGHT SIDE!

ANSICHT/VIEW "A"

ANSCHLUSSTEILE MIT KENNZEICHNUNG
(SIEHE "ZZ") VERSEHEN!
CONNECTION PARTS TO BE MARKED!
(SEE "ZZ")

SCHRAUBEN BZW. MUTTERN
MIT MOTORENDEL EINGESETZT.
BOLTS AND NUTS RESP.
INSTALLED WITH MOTORENDEL.
($\mu_G = \mu_K = 0.12$)
ANZUGSMOMENT
TIGHTENING TORQUE
POS. 3 - 250.0 + 30.0 NM
POS. 5 - 505.0 + 50.0 NM
POS. 7 - 505.0 + 55.0 NM
POS. 15 - 175.0 + 20.0 NM

ALF JEDEM SEGMENT
ON EVERY SEGMENT

KOM.-NR.: .../...-1
COMM.-NO:
z.B./eg.: 0000-0/95-1
-2

STUECKLISTE NR.:
PARTLIST NO:
EG3351A006
EG3352A006
EG33537A006
EG3358A006
EG3359A006
EG3357A006

XX: SCHNITTSTELLENKENNZEICHNUNG DER SEGMENTE
SECTIONAL SEGMENT MARKING
YY: KENNZEICHNUNG DER ELEMENTE (z.B. 1-1 REIHE 2-2 REIHE...)
MARKING OF ELEMENTS (eg. 1-SINGLE- ROW 2-DOUBLE-ROW...)
ZZ: KENNZEICHNUNG DER GRUNDSTELLUNG MIT FORTLAUFENDER NUMERIERUNG DER KUPPLUNG PRO KOM
z.B.: 1 - 1 KUPPLUNG DER KOM.-NR. 0000-0/95-1
2 - 2 KUPPLUNG DER KOM.-NR. 0000-0/95-2
MARKING OF BASIC POSITION WITH CONSECUTIVE NUMBERING OF COUPLING PER COMM.-NO.
eg: 1 - 1 COUPLING OF COMM.-NO 0000-0/95-1
eg: 2 - 2 COUPLING OF COMM.-NO. 0000-0/95-2

NORMAL AUSFUEHRUNG
STANDARD DESIGN

VERFAHREN	ANWENDUNG	GRUNDZUG	GRUNDZUG	GRUNDZUG	GRUNDZUG
1	1	1	1	1	1
EG3351A006	EG3351A006	EG3351A006	EG3351A006	EG3351A006	EG3351A006
EG3352A006	EG3352A006	EG3352A006	EG3352A006	EG3352A006	EG3352A006
EG33537A006	EG33537A006	EG33537A006	EG33537A006	EG33537A006	EG33537A006
EG3358A006	EG3358A006	EG3358A006	EG3358A006	EG3358A006	EG3358A006
EG3359A006	EG3359A006	EG3359A006	EG3359A006	EG3359A006	EG3359A006
EG3357A006	EG3357A006	EG3357A006	EG3357A006	EG3357A006	EG3357A006

VULKAN
BREMSE
ELASTISCHES TEIL
DREIHEBIG

EG33530A006
(2)

Imagen 21. Acoplamiento elástico tres hileras. Fuente [4]

4. ANALISIS DE AVERIA

El Análisis de la Causa Raíz (ACR) es un proceso que identifica los sucesos responsables del fallo de las máquinas y utiliza esa información para definir las acciones adecuadas que eviten fallos futuros. En el proceso se suelen investigar tres tipos básicos de causas del fallo:

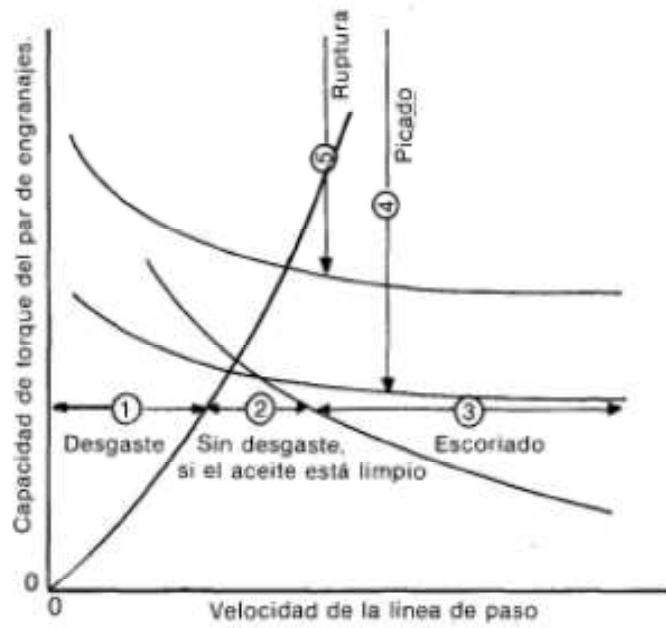
- Físicas o técnicas.
- Errores humanos por acción u omisión.
- Sistemas organizativos, procedimientos operativos y toma de decisiones. [5]

Analizaremos en un primer momento la avería en sí, para luego ver los factores que la producen e intentar saber de forma precisa el origen del problema.

4.1 FALLOS EN REDUCTORA

En la reductora nos encontramos con los siguientes fallos:

- Rotura de diente, resultado de sobrecargas o por ciclos de esfuerzo de los dientes. [6]
- Desgaste, eliminación continua de material de la superficie.
- Picaduras, proceso de fatiga. El picado inicial se presenta en pequeñas áreas sobre esforzadas y cuando se redistribuye la carga, el picado cesa. Se puede presentar por errores en el perfil del diente, irregularidades superficiales o pequeños desalineamientos. Cuando se deja progresar el picado inicial, considerables porciones del diente desarrollan cráteres de picado de variadas formas y tamaños, esto resulta de sobrecargas superficiales que no se aliviaron con el picado inicial.[7]
- Oxidación, este fallo se manifiesta cuando existe reacción química o electroquímica entre los engranajes y su entorno, se observan superficies manchadas u óxido con depósitos color marrón rojizo. Suele ser debida a la contaminación del lubricante con agua o ácido. [8]
- Aceite espumante, causado por la mezcla con otros lubricantes o contaminantes como agua o polvo. Un incremento en la entrada de aire debido a un alto nivel de aceite, puede causar altas velocidades de flujo de aceite inyectado provocando un aumento de espumación.[9]



- Descripción: Región 1.— Carencia de película de aceite debido a baja velocidad
 2.— Buena película de aceite
 3.— Demasiado calor generado
 4.— Aquí, ocurrirá picado con el tiempo.
 5.— Ocurrirá ruptura del diente con el tiempo.

Imagen 22. Regiones de falla del engranaje. Fuente [6]

4.2 LUBRICACION, RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE PARA EL USO DE ACEITE LUBRICANTE.

El fabricante de la caja reductora recomienda utilizar Aceite SAE 40, TBN Max 20 y FZG 11. Obsérvese la recomendación del TBN menor a 20 para cajas reductoras con acoplamiento.

To be observed in selecting oil for use in REINTJES gears:

1. Optimum viscosity range at operating temperature, gearboxes with **anti-friction bearings** and SAE 30 is between 20 and 60 mm²/s (cSt), SAE 40 is between 35 and 80 mm²/s (cSt) and gearboxes with **plain bearings** and SAE 40 is between 60 and 120 mm²/s (cSt).
2. If oil temperature is lower than
+ 10°C / 50°F (SAE 30)
+ 15°C / 59°F (SAE 40)
a sump heating installation is required (special equipment must be fitted to the gearbox).
3. Mineral oils containing solid lubricants (e.g. molybdenum disulphide MoS₂) must not be used.
4. Highly alkaline engine oils (TBN >20) must not be used with built-in disc-clutch.
5. Turbine oils must not be used.

Imagen 23. Observaciones para la elección del aceite lubricante. Fuente [1]

Ipiranga productos de petróleo SA es una empresa distribuidora de productos refinados del petróleo y lubricantes y es el proveedor del buque

El plan de mantenimiento realizado por Ipiranga recomienda la utilización del aceite Aurelia XL 4030 para caja reductora. Las características del Aurelia XL 4030 son SAE 40, TBN 30, FZG desconocido.

Ipiranga no realiza test de índice de FZG de estos aceites. En la hoja de características del aceite se recomienda para lubricación de reductores y engranajes.

4.3 METODOS DE PRUEBA PARA INFLUENCIAS RELACIONADAS CON EL LUBRICANTE EN LA CAPACIDAD DE CARGA (FZG-TEST)

Los bancos de prueba para el ensayo de transmisiones por engranajes, permiten simular las condiciones del contacto real que se genera entre los dientes de estos elementos, para evaluar su comportamiento ante determinadas variables que pueden ser establecidas y controladas, por ejemplo: velocidad de rotación, carga aplicada, temperatura del lubricante, entre otras. [10]

La prueba FZG evalúa las propiedades de lubricación de fluidos y protección contra el desgaste en la interfaz de un conjunto de engranajes cargados.

Durante la Prueba FZG, los engranajes se cargan a través de un acoplamiento torsional que se configura en condiciones de carga o etapas conocidas. Los engranajes son rotados por un motor eléctrico de velocidad variable. La temperatura del fluido se controla mediante elementos de calentamiento y o enfriamiento.

Desgaste de engranaje FZG (ASTM D5182)

Evalúa la resistencia a la fricción de los dientes del engranaje de los fluidos usando engranajes de perfil A. El equipo se opera a través de hasta 12 etapas de carga progresiva a intervalos de 15 minutos. Las pruebas estándar se ejecutan a una temperatura de fluido de 90 ° C, aunque la prueba MERCON-V / SP se ejecuta a 150 ° C. Los dientes del engranaje se inspeccionan después de cada etapa de carga para raspar. Además de una evaluación visual del estado del diente del engranaje, se mide la pérdida de peso del engranaje.

Desgaste de engranaje FZG (ASTM D4998)

Evalúa la resistencia al desgaste de los dientes del engranaje de los fluidos utilizando engranajes de perfil A. El equipo se opera a 100 rpm bajo carga constante durante 20 horas. Se mide la calificación visual de la superficie del diente y la pérdida de peso del engranaje.

Picaduras de FZG - Engranajes tipo C

Evalúa la resistencia a picaduras de engranajes de fluidos utilizando engranajes de perfil C. Las pruebas se ejecutan hasta 300 horas bajo carga constante, temperatura y velocidad. Las inspecciones se llevan a cabo a intervalos predeterminados para detectar daños en las caras de los dientes del engranaje.

FZG A10 / 16.6R / 120

Una versión más severa de la prueba de desgaste de la etapa de carga ASTM D5182. Esta prueba requiere engranajes A10 (la mitad del ancho del diente de los engranajes A), y se ejecuta en modo inverso. [11]

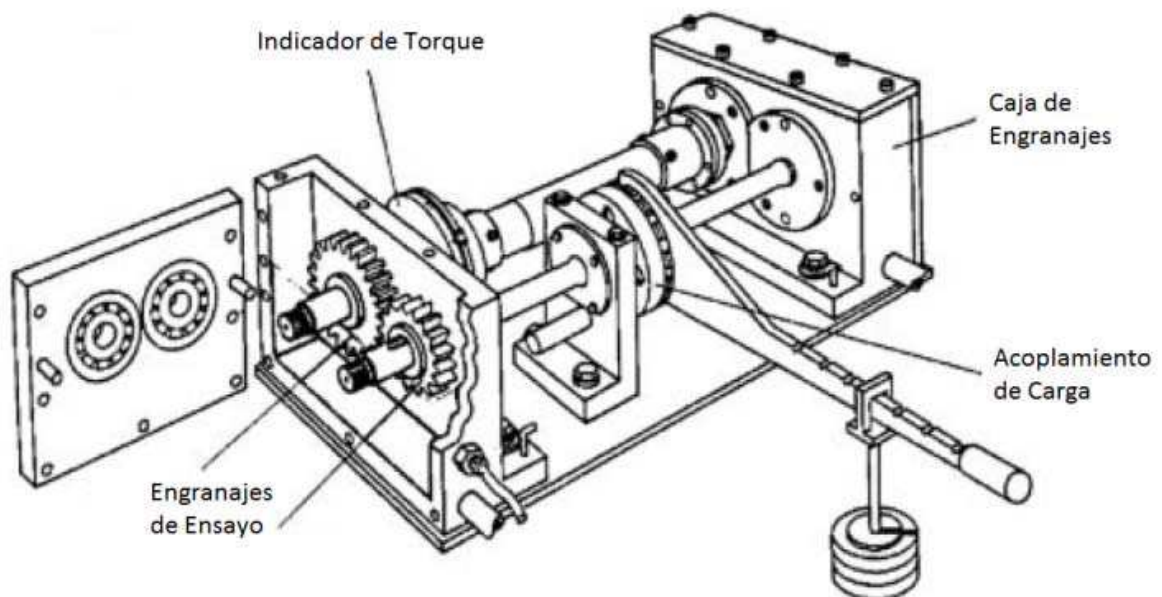


Imagen 24. Esquema de la máquina de ensayo FZG. Fuente [14]

Esta prueba es la que se debería de haber llevado a cabo después del incidente en la caja reductora. La dirección técnica de la empresa desestimó su realización.

5. CONCLUSIONES

Se pueden extraer las siguientes conclusiones como posibles causas de la avería:

La primera causa de avería a analizar sería el porqué no se realizó el mantenimiento programado por el fabricante en tiempo estimado. El fabricante nos dice que la revisión completa del equipo se debe realizar a las 60000 horas o 10 años. Las horas del reductor a 02/06/2012 son de 35358, no disponemos de información detallada de las horas anuales que pueden variar de un año a otro por diferentes factores, fletes, averías, reparaciones programadas etc.. es por eso que calculo una media de 3200 horas anuales. Está claro que por horas este mantenimiento no tendría que realizarse, cuando la tripulación avisa de que los filtros empiezan a salir muy sucios y aparece presencia de agua en los análisis de las muestras de aceite estimo que el equipo tendría unas 29000 horas. La ultima varada previa a la avería se produce en 2010, 9 años de trabajo, si bien en la inspección realizada en esa varada no se encuentra ningún tipo de anomalía, estimo que en cuanto la tripulación avisa de problemas en la reductora a finales de 2010 y principios de 2011 si se tendría que haber programado por parte de la inspección técnica una revisión completa para ver indicios de problemas.

Contaminación del aceite de la caja reductora, por agua o una substancia corrosiva. Analizando los datos expuestos a lo largo del trabajo se ve una pequeña cantidad de agua en los análisis que aparece y desaparece en análisis sucesivos, llamando la atención que hasta la revisión completa no se hace referencia a la presencia de aceite espumante. La tripulación del buque informa que sobre noviembre de 2010 los filtros de aceite estaban muy tupidos durante las revisiones periódicas y los análisis muestran presencia de agua, en cantidades pequeñas. Si bien se entiende que la tripulación revisó el circuito de refrigeración y desestimó problemas en el mismo, considerando que la presencia de agua es debida a condensaciones, no es entendible que no se avise del comienzo de la oxidación. Esta oxidación puede llevar a una falla por desgaste debido a la corrosión, se manifiesta cuando existe reacción química o electroquímica entre los engranajes y su entorno, se observan superficies manchadas u óxido con depósitos color marrón rojizos [8]. Esta falla es debido a la contaminación del lubricante con agua o ácido. Se debe de tener en cuenta que los filtros se limpiaban, no sustituían, y sería importante analizar si los productos utilizados no fuesen adecuados.

No menos importantes son las pérdidas de aceite continuas por conexiones, que se comenta en el apartado 2.2, estas pérdidas pueden producir un continuo bajo nivel de aceite, este bajo nivel de aceite deja poco tiempo a la separación de los depósitos, acelera la alteración del aceite y provoca la formación de espumas. Esta espuma puede provocar cavitación en la bomba, fallos en la lubricación de cojinetes y aceleración del proceso de oxidación.

Mala aplicación del aceite, TBN superior al recomendado e índice FZG indefinido para Aurelia XL 4030. Después de una búsqueda exhaustiva para encontrar el FZG del aceite, Ipiranga no realiza el test pero otras empresas si lo podrían realizar, la única equivalencia encontrada es con el Argina T40, véase anexo I, y su FZG es 12, superior al recomendado por el fabricante. Si bien la viscosidad es la propiedad fundamental a la hora de elegir un lubricante y en este caso se corresponde con las características requeridas por el fabricante, conocer el índice FZG nos permitiría saber si las propiedades del lubricante son las adecuadas para la protección contra el desgaste en el conjunto de engranajes cargados. El alto TBN, el numero base del aceite indica cuantos aditivos tiene el aceite para evitar la corrosión. Cuanto más alto es el valor de este número, más protección se tendrá contra la corrosión. Pero cada punto que aumentamos de TBN normalmente aumentamos el nivel de cenizas sulfatadas que pueden formar más depósitos [12]. En este caso el fabricante hace hincapié en que el TBN no sea superior a 20.

Acción de la deformación permanente del 90% de las piezas de caucho analizadas del acoplamiento elástico entre motor y caja reductora, esto hace pensar que un deterioro de estas piezas produciría un aumento de los esfuerzos radiales y axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales. En ningún caso se nombran estas vibraciones, ni por parte de la tripulación y ni de los técnicos en inspección previa a la reparación.

Respecto a los medios humanos implicados llama la atención que antes de la inspección llevada a cabo en 2012 no se tuviese referencia de la espuma en el aceite. Queda claro que la fecha de inspección realizada se alarga mucho desde el momento en que la tripulación avisa de que tienen problemas con los filtros. La tripulación avisa de problemas con los filtros en noviembre de 2010, en febrero de 2012 registran el fallo de los sensores de presión diferencial, hasta junio no se suministran los nuevos sensores, la inspección técnica debería de haber priorizado el suministro de estos. Es llamativo también el que no se referencie la oxidación existente en los ejes y ruedas de la caja reductora, dando a entender que no se realizaban inspecciones visuales rutinarias. En el plan de mantenimiento previsto por Reintjes, no se hace mención a estas inspecciones visuales en

ninguna de sus etapas, teniendo en cuenta que la caja reductora cuenta con registros para su inspección es llamativa su ausencia.

Para prevenir el micropitting se debe maximizar el espesor de las películas, reducir la rugosidad superficial y optimizar las propiedades de los lubricantes evitando aditivos agresivos, manteniendo limpio el fluido durante su vida útil. [13]

Hay que recordar que lo primero que hay que hacer es una selección correcta del lubricante y luego mantenerlo limpio, seco y a la temperatura deseada.

Un registro continuado de inspecciones visuales de la caja reductora podría haber permitido darle la importancia requerida a la avería y minimizarla.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Reintjes operating manual Type: LAF 6645 K41
- [2] Trabajo de campo, fuente propia
- [3] Berg Propulsion AB
- [4] Installation and operating instruction for highly flexible Vulcan-Rato-S coupling series 2100 and 2200
- [5] <http://www.skf.com/co/services/asset-management-services/asset-efficiency-optimisation/optimize/rout-cause-analysis/index.html>
- [6] Ingeniería mecánica. Las fallas de los engranajes/ Luis Eduardo Benítez Hernández
- [7] Adaptación de un moto reductor como banco de pruebas para evaluar la resistencia al desgaste en transmisiones/Laura María Zapata Arteaga/Juan David García García. Escuela de tecnología mecánica 2015
- [8] VIII Conferencia científica internacional de ingeniería mecánica. Deterioro y modos de fallo en engranajes/Ángel Silvio Machado Rodríguez/Jorge L. Moya Rodríguez/Marcos Dantas dos Santos/Constantina Álvarez Peña/Rameses da Silva Botelho/Fabio Junio Franza Cunha/Osmany Pallí Pérez. Noviembre 2014
- [9] Como prevenir la espuma en aceite para engranajes. Machinery lubrication/Rudiger Krethe. Febrero 2015
- [10] Bancos de prueba para el ensayo de transmisiones por engranajes/Jorge Laureano Moya Rodríguez/Guillermo Abreu Ruano/Rafael Goitisoló Espinosa/Yudioski Bernal-Aguilar. Noviembre 2014
- [11] FZG gear testing, <http://www.intertek.com/automotive/atf/fzg/>
- [12] Cepsa. Manual de información técnica. Línea de marinos
- [13] <http://lubrication-management.com/2016/02/11/prevenir-el-micropitting/>
- [14] Máquinas y equipos para el ensayo de transmisiones por engranajes/Guillermo Abreu Ruano/Jorge L. Moya Rodríguez/Jorge Vélez Enríquez/Alberto Velázquez Pérez

ANEXOS

ANEXO I

Industrias

▶ CT 078

TABLA DE EQUIVALENCIAS MARINOS

YPF	ESSO	MOBIL	SHELL
Atlanta Marine D 3005	----	Mobilgard 300	Melina 30 / Melina 5
Disols M 3015	Exmar 12 TP 30	Mobilgard Serie 12	Argina 30 / Gadinis 30 / Rimuls 30
Disols M 4015	Exmar 12 TP 40	Mobilgard Serie 12	Gadinis 40 / Rimuls 40
Aurelia XL 3030	Exmar 30 TP 30	Mobilgard Serie 24	Argina T 30
Aurelia XL 4030	Exmar 30 TP 40	Mobilgard Serie 24	Argina T 40
Aurelia XL 3040	Exmar 40 TP 30	----	----
Aurelia XL 4040	Exmar 40 TP 40	----	Argina X 40
Talusia HR 40	Exmar 40 TP 50	----	Dloma 50
Talusia HR 70	Exmar X 70	Mobilgard 570	Alexia 50

YPF	TEXACO	CHEVRON	CASTROL
Atlanta Marine D 3005	Doro AR 30	Veritas 800 Marine Oil	Marine CDX
Disols M 3015	Toro XD 30	Delo 1000 Marine	Marine MxD 153 / Marine MLC 30
Disols M 4015	Toro XD 40	Delo 1000 Marine	Marine MxD 154 / Marine MLC 40
Aurelia XL 3030	Toro 30 DP 30	Delo 3000	TLX 303
Aurelia XL 4030	Toro 30 DP 40	Delo 3000 40	TLX 304
Aurelia XL 3040	----	Delo 3400 30	TLX 403
Aurelia XL 4040	Toro 40 XL 40	Delo 3400 40	TLX 404
Talusia HR 40	Toro 50 XL 40	----	----
Talusia HR 70	Toro Special 70	Delo Cytol S Special	Cyftech 70