

UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL

SEDE CENTRAL

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Trabajo final de graduación para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería Electromecánica

“Estudio del beneficio del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM con
el aporte de un programa de lubricación, en el sistema turbogenerador de una central
hidroeléctrica”

Jason David Badilla Mora

2022

Universidad Técnica Nacional
Sede Central



Acta de Aprobación 04-2022

En la ciudad de Alajuela, a los 05 días del mes de mayo del año 2022 y participando de forma remota, el Tribunal evaluador conformado por las personas: Ing. Marvin Segura Trejos, Ing. Andrés Gutiérrez Mata, Ing. Luis Varela González, Ing. Willy Romero Padilla, procedieron a evaluar la presentación del proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Electromecánica del estudiante **Jason David Badilla Mora**, identificación **117070916** titulado: **“Estudio del beneficio del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM con el aporte de un programa de lubricación, en el sistema turbogenerador de una central hidroeléctrica.”**, modalidad proyecto de graduación.

El Tribunal Evaluador apegado a las regulaciones y requisitos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, realizó la revisión del proyecto del estudiante otorgando una calificación de **9.7 (nueve punto siete)**, dando como resultado **APROBADO** con mención Honorífica por la calificación obtenida.

MARVIN
GERARDO
SEGURA
TREJOS
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
MARVIN GERARDO
SEGURA TREJOS
(FIRMA)
Fecha: 2022.05.05
19:03:47 -06'00'

Ing. Marvin Segura Trejos
Director Licenciatura Electromecánica

Carta de aprobación del filólogo

Cartago, 28 de marzo de 2022

Los suscritos, Elena Redondo Camacho, mayor, casada, filóloga, incorporada a la Asociación Costarricense de Filólogos con el número de carné 0247, portadora de la cédula de identidad número 3-0447-0799 y, Daniel González Monge, mayor, casado, filólogo, incorporado a la Asociación Costarricense de Filólogos con el número de carné 0245, portador de la cédula de identidad número 1-1345-0416, ambos vecinos de Quebradilla de Cartago, revisamos el trabajo final de graduación que se titula: *Estudio del beneficio del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM con el aporte de un programa de lubricación, en el sistema turbogenerador de una central hidroeléctrica*, sustentado por Jason David Badilla Mora.

Hacemos constar que se corrigieron aspectos de ortografía, redacción, estilo y otros vicios del lenguaje que se pudieron trasladar al texto. A pesar de esto, la originalidad y la validez del contenido son responsabilidad directa de la persona autora.

Esperamos que nuestra participación satisfaga los requerimientos de la Universidad Técnica Nacional.

X ANA ELENA
REDONDO
CAMACHO (FIRMA)

Firmado digitalmente por ANA
ELENA REDONDO CAMACHO
(FIRMA)
Fecha: 2022.03.28 18:13:09 -06'00'

Elena Redondo Camacho
Filóloga - Carné ACFIL n.º 0247

X DANIEL ALBERTO
GONZALEZ MONGE
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
DANIEL ALBERTO GONZALEZ
MONGE (FIRMA)
Fecha: 2022.03.28 18:12:22
-06'00'

Daniel González Monge
Filólogo - Carné ACFIL n.º 0245

DECLARACIÓN JURADA

El suscrito, Jason David Badilla Mora con cédula de identidad número 117070916, declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que implica el delito de perjurio: Que soy el autor (a) del presente trabajo final de graduación, modalidad memoria; para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica Nacional y que el contenido de este trabajo es obra original del suscrito.

Fecha: 05/10/2022

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Jason David Badilla Mora

DEDICATORIA

Al Dios todo poderoso que me ha permitido la vida cada día, que me ha guiado y nunca abandonado, permitiéndome estar y lograr todo lo de hoy.

AGRADECIMIENTOS

A mi papá y a mí mamá que siempre me han dado su bendición, son mi ejemplo de lucha y de felicidad.

A mis amigos que los aprecio con toda el alma y me dan un cambio de aire y un disfrute sano de esta vida.

A mi segunda familia en San Carlos, que me acogió durante gran tiempo del desarrollo de este proyecto.

A mi profesor lector y a mi profesor tutor por estar a mí lado en esta etapa.

A la empresa Coopelesca R.L que me abrió las puertas y tuve un trato muy profesional.

Índice general

I.Cap. I. Introducción	14
1.1 Descripción del problema y alcances.....	16
1.2 Justificación del proyecto.....	18
1.3 Descripción del proyecto	20
1.4 Estado de la cuestión.....	21
1.5 Objetivos	22
1.5.1 Objetivo general	22
1.5.2 Objetivos específicos.....	22
2 Cap. II. Marco teórico referencial	24
2.1 Información de la empresa.....	24
2.2 Centrales hidroeléctricas	24
2.2.1 Sala de máquinas	24
2.3 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	26
2.4 Fundamentos de indicadores del RCM	26
2.4.1 MTBF (tiempo medio entre fallos)	26
2.4.2 MTTR (tiempo medio de reparación)	26
2.4.3 Disponibilidad	27
2.4.4 Mantenibilidad.....	27
2.4.5 Tasa de fallos.....	27
2.4.6 Confiabilidad	27
2.5 Tecnologías del RCM	28
2.5.1 Análisis de vibraciones.....	28
2.5.2 Termografías	29
2.5.3 Análisis de aceite.....	29
2.6 Tribología.....	32
2.6.1 Desgaste.....	33
2.6.2 Lubricación.....	33
2.7 El análisis de aceite	35
2.8 Normas en el análisis de aceite	35

2.8.1	Clasificación del aceite según Norma ISO.....	35
2.9	Pruebas del análisis	37
2.10	Técnica Sacode	48
2.11	Análisis de criticidad.....	51
2.12	Análisis de modo de fallos AMFE.....	52
2.12.1	Índice de prioridad de riesgo IPR.....	52
2.13	Dimensiones del análisis de aceite.....	54
2.14	Frecuencia de muestreo.....	55
2.15	Toma de muestra	57
2.15.1	Presión del sistema	57
2.15.2	Purga para muestreo	57
2.15.3	Limpieza de las botellas de muestreo.....	58
2.15.4	Etiquetas de puertos de muestreo	59
2.16	Almacenamiento del lubricante	60
2.16.1	Almacenamiento por tambores.....	62
2.16.2	Mejores prácticas para el área de almacenamiento	63
2.17	Control de los respiraderos	66
2.18	Metalurgia	67
2.18.1	Metalurgia de cojinetes	67
2.18.2	Metalurgia de las bombas.....	68
2.18.3	Metalurgia del intercambiador de calor.....	68
2.18.4	Metalurgia de tuberías	68
2.19	Software predicción	69
2.19.1	Modelos probabilísticos	70
3 Cap. III.	Marco metodológico	71
3.1	Hipótesis.....	71
3.2	Tipo de investigación	71
3.3	Área de estudio del proyecto.....	71
3.3.1	Línea temática	71
3.3.2	Situación problemática	71

3.3.3	Área temática.....	72
3.3.4	Tema de estudio.....	72
3.3.5	Objeto de estudio.....	72
3.4	Definición de las variables de estudio.....	73
3.5	Muestra.....	74
3.6	Diseño metodológico	74
4 Cap. IV.	Resultados y desarrollo.....	77
4.1	Estudio del estado actual de disponibilidad	77
4.2	Estudio de falla crítica.....	78
4.2.1	Estudio de fallas ligadas a las centrales hidráulicas	81
4.3	Propuesta de un programa de lubricación	84
4.3.1	Análisis de criticidad	84
4.3.2	Determinación de los modos de falla	90
4.3.3	Análisis de modos de falla AMFE	93
4.3.4	Selección de pruebas para el análisis de aceite	94
4.3.5	Definición de los límites.....	100
4.3.5.1	Representación gráfica de los límites	102
4.3.6	Definición de la frecuencia.....	103
4.4	Correcta toma de muestra y otros factores.....	105
4.4.1	Volumen de purgado	107
4.4.2	Selección de la botella de muestreo	107
4.4.3	Etiquetado de los puertos de muestreo	108
4.4.4	Origen de las partículas de desgaste.....	109
4.4.5	Evaluación y recomendación del almacenamiento y los tipos de respiraderos	110
4.5	Evaluación y mejora de los análisis de aceite	113
4.5.1	Extensión de la vida útil	114
4.5.2	Límites estándar y pruebas faltantes	115

4.6	Guía para la toma de decisiones de un análisis de aceite.....	117
4.7	Análisis costo-beneficio	122
4.7.1	Estudio de mercado	122
4.7.2	Estudio técnico	124
4.7.2.1	Inversión inicial.....	124
4.7.2.2	Estimación de ganancias por reducción de fallas	125
4.7.3	Estudio financiero.....	127
4.7.4	Escenarios y probabilidad del proyecto.....	128
4.7.5	Definición de supuestos.....	129
4.8	Software de predicción.....	130
4.8.1	Estimación de disponibilidad actual durante falla sin el programa de lubricación.....	130
4.8.2	Estimación de disponibilidad futura durante falla con el programa de lubricación.....	132
4.8.3	Resultado del beneficio en la disponibilidad durante falla.....	134
5 Cap. V.	Conclusiones y recomendaciones	135
5.1	Conclusiones	135
5.2	Recomendaciones.....	137
6	Bibliografía.....	138
	ANEXOS	149
	Anexo 1. Espectrometría infrarroja por transformadas de Fourier	150
	Anexo 2. Información cojinetes Zollern	151
	Anexo 3. Información cojinetes Renk	152
	Anexo 4. Funciones de confiabilidad para modelo predictivo	153
	Anexo 5. Informe técnico de falla en acople, eje y cojinete	154
	Anexo 6. Tiempos de fallas	162
	Anexo 7. Límites base	165
	Anexo 8. Hoja de datos del puerto y la manguera	169
	Anexo 9. Detalles costos de pruebas para los análisis de aceite	171
	Anexo 10. Detalles de costos para puertos de muestreo	174
	Anexo 11. Tablas de extensión de vida.....	175

Anexo 12. Configuración de las unidades hidráulicas	176
Apéndices	177
Apéndice A. Datos de disponibilidad inicial.....	177
Apéndice B. Datos de las centrales hidroeléctricas	178
Apéndice C. Límites de los aceites	181
Apéndice D. Cálculo línea base para conteo de partículas	185
Apéndice E. Herramienta gráfica Excel.....	188
Apéndice F. Cálculo de la frecuencia	191
Apéndice G. Cálculo de valor de purga	193
Apéndice H. Costos de las centrales hidroeléctricas.....	194
Apéndice I. Flujos de Microsoft Excel	196
Apéndice J. Escenarios y probabilidad financiera del proyecto	197
Apéndice K. Cálculos del Software de simulación para la estimación del beneficio en la disponibilidad.....	199

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación del IPR.....	53
Tabla 2. Indicadores de las variables de estudio.	73
Tabla 3. Datos resumen de confiabilidad CH La Esperanza y CH Aguas Zarcas	77
Tabla 4. Cotización del taller Riggioni para falla de cojinetes	79
Tabla 5. Datos resumen de las fallas en los sistemas turbogeneradores	81
Tabla 6. Matriz de criticidad	85
Tabla 7. Valores de probabilidad	85
Tabla 8. Análisis crítico de los equipos del sistema turbogenerador	88
Tabla 9. Modos de falla del conjunto distribuidor	90
Tabla 10. Modos de falla del intercambiador de calor.....	91
Tabla 11. Modos de falla de los cojinetes	91
Tabla 12. Modos de falla de la bomba mecánica	92
Tabla 13. Valores IPR del análisis modos de falla.....	94
Tabla 14. Evaluación de las pruebas del análisis de aceite frente a los modos de falla	96
Tabla 15. Simbología de la evaluación de las pruebas de análisis de aceite.....	97
Tabla 16. Pruebas de rutina del análisis de aceite	99
Tabla 17. Pruebas de excepción del análisis de aceite	99
Tabla 18. Límites preventivos y críticos para los aceites de la central La Esperanza	101
Tabla 19. Frecuencias estipuladas para el análisis de aceite	104
Tabla 20. Valor de purga en ml para la toma de muestra	107
Tabla 21. Selección del nivel de limpieza de las botellas de muestreo.....	108
Tabla 22. Contaminantes y sus orígenes entre los sistemas hidráulicos	109

Tabla 23. Condiciones de los cuartos de almacenamiento y los respiradores.....	111
Tabla 24. Comparación de los límites de conteo de partículas según ISO 4406:99	114
Tabla 25. Tabla de extensión de vida por partículas	115
Tabla 26. Precios de los lubricantes	122
Tabla 27. Precios de los filtros	123
Tabla 28. Cotizaciones de los análisis de aceite	123
Tabla 29. Inversión para implementar el programa de lubricación en la CH La Esperanza	124
Tabla 30. Ganancia del caso 1 al implementar el programa de lubricación.....	125
Tabla 31. Ganancia del caso 2 al implementar el programa de lubricación.....	126
Tabla 32. Indicadores financieros del proyecto de lubricación.....	127
Tabla 33. Datos de la evaluación de escenarios financieros	128
Tabla 34. Beneficio del programa de lubricación en una central hidroeléctrica.....	134

Índice de gráficos

Gráfico 1. Riesgo final anual de los equipos del sistema turbogenerador	89
Gráfico 2. Resultados del número ácido para los análisis del año 2021, CH La Esperanza	103

Índice de figuras

Figura 1. Sistema turbogenerador de la CH Chocosuela	25
Figura 2. Programas de RCM	28
Figura 3. Fortalezas y debilidades del análisis de vibraciones vs el análisis de aceite	31
Figura 4. Fortalezas y debilidades de las distintas tecnologías dentro de un RCM..	32
Figura 5. Ejemplo didáctico de la lubricación entre dos superficies en contactos....	32
Figura 6. Tabla de viscosidad Norma ISO y su tolerancias +-10%	36
Figura 7. Definición de rangos ISO 4406:99 y ejemplo	44
Figura 8. Parámetros de la técnica Sacode en el análisis de aceite	50
Figura 9. Datos del análisis según la técnica Sacode.....	51
Figura 10. Clasificación de la gravedad del modo de falla.....	53
Figura 11. Clasificación de la frecuencia/probabilidad de ocurrencia del modo de falla	53
Figura 12. Clasificación de facilidad de detección del modo de falla	53
Figura 13. Diagrama de dos dimensiones aplicado al análisis de aceite	54
Figura 14. Herramienta para determinación de la frecuencia	56
Figura 15. Definición del nivel de limpieza en botellas de muestreo	58
Figura 16. Consecuencias de tambores mal almacenados	61
Figura 17. Envase desechable para lubricación	61
Figura 18. Envase de alta calidad para lubricación.....	62
Figura 19. Correcto almacenamiento de tambores.....	63
Figura 20. Formas de almacenamiento para tambores.....	63
Figura 21. Características de un adecuado cuarto de almacenamiento.....	65
Figura 22. Mecanismos del control de aire en tanques de depósito.....	66

Figura 23. Resumen de los cojinetes antifricción y su material base	67
Figura 24. Ejemplo de gráfico interactivo en Wolfram	69
Figura 25. Función de Densidad de Probabilidad de la variable T	70
Figura 26. Daño recibido por la cara de la guía del eje	80
Figura 27. Pasos estándar para una correcta toma de muestra.....	106
Figura 28. Ejemplo de etiquetado del puerto de muestreo de lubricación	109
Figura 29. Cuarto de almacenamiento de la central hidroeléctrica de Cubujuquí ..	110
Figura 30. Respiradores de cuba de lubricación en la CH Cubujuquí.	112
Figura 31. Respirador de cuba de regulación en la CH Cubujuquí.....	112
Figura 32. Análisis de aceite de la CH La Esperanza	116
Figura 33. Diagrama de flujo inicial para toma de decisiones.....	119
Figura 34. Diagrama de flujo para toma de decisiones, sección A.....	120
Figura 35. Diagrama de flujo para toma de decisiones, sección B y C	121
Figura 36. Código para cálculo de valor aleatorio Wolfram.....	130
Figura 37. Función de densidad de probabilidad para las fallas sin el programa de lubricación	131
Figura 38. Generación de datos para confiabilidad con el programa de lubricación en el software Wolfram	133
Figura 39. Función de densidad de probabilidad para las fallas con el programa de lubricación	133

GLOSARIO

Acrónimo AA

Análisis de aceite

Acrónimo CH

Central hidroeléctrica

AN

Número ácido

ASTM

Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

DRF

Ferrografía de lectura directa

ICE

Instituto Costarricense de Electricidad

ISO

Organización Internacional para la Estandarización

KOH/g

Miligramos de hidróxido de potasio por gramo de aceite

PDF

Función de densidad de probabilidad

PQ

Índice por inducción electromagnética

RCM

Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad

RPVOT

Prueba de oxidación por recipiente rotativo a presión

RULER

Rutina de evaluación de la vida útil restante

W

Watts

WPC

Concentración de partículas de desgaste (Wear Particles Concentration, en inglés)

ZDDP

Dialquil ditiofosfato de zinc (aditivo más común en aceites)

RESUMEN

Palabras Clave: Mantenimiento RCM, Programa de Lubricación, Centrales Hidroeléctricas, Análisis de Aceite y Sistema Turbogenerador.

El presente proyecto buscó evidenciar el beneficio de un programa de lubricación basado en el análisis de aceite para las centrales hidroeléctricas de Coopelesca R. L.

Se desarrolló un programa de lubricación de clase mundial, basado en las normas ASTM y las investigaciones de la compañía experta en aceites Noria Corporation, que identifica los puntos de mejora en las unidades hidráulicas y es base para llevar a cabo un análisis de aceite que permita evaluar el estado real del conjunto turbogenerador de cada casa máquina. Para ello, se desarrolló todo el proceso de identificación de equipos críticos y selección de pruebas de aceite, determinación de los límites condicionales para los equipos, estipulación de las frecuencias de muestreo, estandarización del proceso de toma de muestra, guía para la toma de decisiones y el respectivo estudio financiero para respaldar el proyecto ante la Gerencia.

A su vez se desarrolla una determinación, mediante estadística y software, del impacto de la implementación del programa de lubricación para la disponibilidad de los equipos, esto representa la oportunidad de ahorro de las pérdidas de producción debido a los paros no programados, basados en el historial de data del último año 2020-2021.

El beneficio calculado puede llegar a ser de un 35.74% ($\pm 2.75\%$) lo que representa una estimación económica de ₡15.508.165,65 (de colones) anuales con la implementación adecuada del programa de lubricación.

Los resultados económicos, estadísticos y matemáticos llevados a cabo respaldan el proyecto de forma positiva, porque la inversión del programa de lubricación permite tener más control del estado de los equipos, da herramientas para la toma de decisiones de mantenimiento, reduciendo así la severidad de las fallas y sus costos asociados.

I. Cap. I. Introducción

El presente trabajo estudia el beneficio sobre el plan de mantenimiento basado en confiabilidad, de la integración de un programa de lubricación para el sistema turbogenerador de las centrales hidroeléctricas de Coopelesca R. L. Lo anterior mediante la reducción del impacto en la disponibilidad, durante falla, asociados con los sistemas hidráulicos.

En los últimos años la demanda de electricidad ha venido en aumento y debido a la pandemia esta demanda se ha disparado. Por lo tanto, se necesita el mayor tiempo posible de operación de las centrales hidroeléctricas, mediante una implementación del mantenimiento RCM con las tecnologías de análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceites. Estas tecnologías no invasivas pueden llevar un monitoreo de la condición de los equipos sin necesidad de detener su funcionamiento.

El Área de Mantenimiento de Coopelesca R. L. ha implementado el modelo de mantenimiento RCM con el análisis de vibraciones y termografía. Asimismo, tiene pendiente un buen programa de lubricación basado en el análisis de aceite, que brinde más herramientas para la toma de decisiones.

El tipo de investigación es cuantitativo pues se justifica el planteamiento y la necesidad del programa de lubricación en el mantenimiento basado en la confiabilidad, se analizan datos de indicadores de confiabilidad, disponibilidad e indisponibilidad principalmente durante situaciones de falla ligadas a la lubricación. Además, se implementa el análisis de aceite, lo que genera los tipos de pruebas por aplicar y sus líneas base, tiempos de muestreo y se definen acciones preventivas en sinergia con las demás tecnologías del RCM.

Esta implementación requirió del análisis de criticidad y análisis de modo de fallo, para la selección de las pruebas de rutina y excepción que responden a los modos de fallo

más críticos y de mayor impacto. Asimismo, se llevó a cabo el estudio financiero abarcando la mayor cantidad de variables posibles para tener las bases hacia un programa de lubricación de clase mundial.

Por último, el análisis de costo-beneficio de su implementación demuestra que el proyecto es rentable y supone un retorno de la inversión en 10 meses, mientras que el modelo matemático estima mejoras de un 35.74 % (± 2.75 %) en la disponibilidad ante las fallas ligadas a los sistemas hidráulicos del último año. Lo anterior significa para la compañía un ahorro de un estimado de ¢15,508,165.65 millones anuales neto, además de asegurar calidad energética a todos los asociados de la Cooperativa.

1.1 Descripción del problema y alcances

Una central hidroeléctrica es una instalación que aprovecha la energía contenida en una masa de agua para transformarla en energía eléctrica. En términos gerenciales de producción la *materia prima* es el agua y el *producto final* la electricidad que consumirá, valga la redundancia, el consumidor. Es por este motivo que las hidroeléctricas necesitan controlar y monitorear en todo momento el estado de los equipos y componentes, para garantizar la producción, además de las condiciones de la turbina, el generador, cojinetes y los equipos auxiliares del sistema. Con esto se garantiza el servicio continuo de generación, es decir, garantiza la disponibilidad y confiabilidad de las centrales hidroeléctricas.

La Cooperativa Coopelesca R. L. está comprometida con todo el cantón de San Carlos y en el ámbito eléctrico se dedica a la generación y distribución de energía eléctrica directamente a sus asociados, además, maneja una potencia de generación de electricidad de 84 MW en distintas centrales hidroeléctricas y 5 MW en un parque solar. La potencia de las centrales hidroeléctricas proviene de CH Chocosuela con 26 MW, CH Cubujuquí con 22.40 MW, CH Platanar con 15.50 MW, CH La Esperanza con 5.51 MW y CH Aguas Zarcas con 14.74 MW.

En la actualidad, se ha desarrollado un plan de mantenimiento que se basa en confiabilidad RCM incompleto para estas centrales, contando con dos de los tres programas de condición más importantes, el análisis de vibraciones mecánicas y las termografías. Estas son incapaces de abarcar el total de modos de fallo que puedan surgir en algunos componentes del sistema de turbogenerador, debido a que según datos de Noria (2018) solo: “Utilizando de manera coordinada las tecnologías de monitoreo condición, se tiene cubierto casi el 95% de los modos de fallas relacionados con maquinaria rotativa” (s. p.).

Por lo tanto, los datos que recopilan dos programas de condición son insuficientes para determinar variables críticas. Por ejemplo, en los cojinetes el análisis de aceite identificará fallas potenciales por contaminación y desgaste, mientras que el análisis de vibraciones desequilibrio y desalineación.

Por este motivo, el proyecto busca determinar el beneficio de establecer el programa de lubricación dentro del RCM. Además, es importante mencionar que se abarcan elementos que se relacionan con los sistemas hidráulicos y todo el estudio, análisis, toma de datos, definición de parámetros y otros, para la implementación correcta del programa de lubricación.

Sin embargo, también está dentro del alcance la sinergia y el beneficio de considerar en conjunto el análisis de lubricación, el análisis de vibraciones mecánicas y las termografías para abarcar todos los modos de falla. Además, en cuanto a la mejora de la gestión adecuada del mantenimiento del sistema turbogenerador el estudio ofrece controlar la parte más crítica de todo equipo, su lubricación, desde la perspectiva del RCM. Como lo mencionan Terradillos y Ciria (2013):

Según un estudio realizado por GE en 1991 la turbina ocasiona el 20% de las paradas de una planta de energía convencional. De este 20%, GE dice que el 19% de los problemas asociado al conjunto turbogenerador están relacionados con el aceite (s. p.).

Por este motivo, atacar ese 19 % representa beneficios inmediatos a las centrales hidroeléctricas de Coopelesca R. L.

1.2 Justificación del proyecto

De acuerdo con los problemas mencionados, las fallas y los paros en el sistema afectan directamente a miles de personas en el cantón de San Carlos y afecta en términos económicos a la Cooperativa. El mantenimiento RCM es un gran avance para lograr una alta disponibilidad de las máquinas, sin embargo, sin la implementación de la herramienta de análisis de aceite es imposible predecir el estado real de los equipos de las unidades hidráulicas, hasta el momento en que sea muy tarde y la severidad de la falla muy elevada, lo que provocaría mayor gasto económico y mayor tiempo de parada.

Este estudio del programa se justifica por aumentar la fiabilidad de los componentes de operación turbogenerador sin la necesidad de detener la producción, seguidamente de la protección que brinda a todos los equipos involucrados ante eventuales fallas, gracias al adecuado análisis de datos y control. Por último, se obtiene un mejor diagnóstico, supervisión y control de la calidad del estado de condición de los activos productivos. Como lo mencionan los archivos de Noria Corporation (2018) es importante contar con un plan de lubricación:

El análisis de aceite (AA) es una poderosa herramienta de monitoreo de condición, contribuye a incrementar la confiabilidad de la maquinaria y equipo. No es solo una tecnología a usarse en el mantenimiento predictivo sino para la búsqueda de causas-raíz de fallas; una valiosa piedra angular del mantenimiento proactivo. (s. p.).

Por otra parte, al abarcar el historial de fallas muchas vienen ligadas al mal control, manejo y almacenamiento del lubricante, por lo que se ve contaminado y afecta sus propiedades de lubricación, lo que da una idea errónea de *lubricante nuevo*. De acuerdo con Noria Corporation (2018): “Es común obtener importantes beneficios en la limpieza

del lubricante, la cual está relacionada directamente con la confiabilidad de la maquinaria, con una mínima inversión” (s. p.).

El mantener un aceite limpio, seco y fresco, asegura tener equipos confiables y puede alargar la vida útil de los equipos al permitir la correcta transmisión de calor y de trabajo. Asimismo, permite evitar la generación de desgaste abrasivo, adhesivo y erosivo y evita el deterioro por oxidación y corrosión.

1.3 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en reducir el impacto en la disponibilidad del conjunto turbogenerador, ocasionado por una falla relacionada con los sistemas hidráulicos de lubricación y regulación. Lo anterior mediante el aporte de un programa de lubricación que se basa en el análisis de aceite y el actual mantenimiento RCM.

Por este motivo, se desarrolla un estudio completo del programa de lubricación, en el que junto con los programas de vibraciones mecánicas y termografías incidan directamente en la detección de todos los modos de falla dentro del sistema. Esto da como resultado un beneficio a la empresa en horas de generación eléctrica (su equivalente económico) y al ingeniero las herramientas para tomar la decisión basada en condición, de intervenir el equipo antes de que suceda una falla crítica.

De esta forma, se debe realizar el estudio para determinar ¿Cuál es el beneficio de implementar adecuadamente un programa de lubricación en sinergia con los demás programas del mantenimiento con base en confiabilidad de las centrales de generación de Coopelesca R. L?

Con esto la empresa evolucionará de mantenimientos definidos por tiempo, como mensuales, semestrales o anuales (mantenimientos que no cuentan con un beneficio claro dentro de la gestión), a mantenimientos que se basan en condición, obteniendo datos directamente del equipo y el entorno propio de trabajo.

Por otra parte, es importante destacar que las acciones de mayor peso se toman en consideración de datos a partir de uno, dos o tres tecnologías no destructivas. Esto para dar mayor seguridad y respaldo de la decisión ante la Gerencia.

1.4 Estado de la cuestión

Entre los estudios sobre análisis de aceite que existen, un grupo de estudiantes de la Universidad de Zulia utilizó la técnica Sacode para evaluar la condición de motores de combustión interna de una planta de generación de energía eléctrica. A partir de esto desarrollaron un *software* en la plataforma de MATLAB para graficar los históricos de las distintas variables y los límites correspondientes. De esta forma, lograron predecir la tendencia de dos de las variables más importantes en análisis de aceite de motores, viscosidad y el número básico (Martínez Jiménez *et al.*, 2014).

Por otra parte, Terradillos y Ciria (2013) evalúan las condiciones de una correcta lubricación en turbinas a través del análisis de aceite, donde se mencionan las pruebas más comunes y la frecuencia base estipulada por la norma ASTM D 4387—97. A partir de esto definen un programa de lubricación que se basa en el análisis de aceite para turbinas de vapor y gas, definiendo pruebas, límites y frecuencias.

Por último, a las dos unidades de generación de la central hidroeléctrica de Saymirín V se le determinaron los equipos más críticos mediante una matriz de criticidad y por medio de decisiones del RCM elaboraron el plan de mantenimiento. En la tesis de trabajo de Cabrera Ramón y Tapia Gonzáles (2019), identificaron al generador, el cojinete superior y el sistema de inyección (turbina Francis) como los equipos más críticos y a los cuales se les definieron las tareas específicas para cada modo de fallo.

1.5 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos del estudio.

1.5.1 Objetivo general

Analizar el beneficio de la implementación de un programa de lubricación al mantenimiento RCM, mediante análisis de aceites, que evalúe el estado condición de los componentes críticos del sistema turbogenerador, para la reducción del impacto en la disponibilidad durante una falla asociada con los sistemas hidráulicos, en un 30 % de la central hidroeléctrica La Esperanza de Coopelesca R. L. y aplicar un modelo matemático para la estimación de este beneficio a un año, lo esperado para el año 2022.

1.5.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

1. Determinar el estudio de confiabilidad del sistema turbogenerador, mediante análisis de datos de operatividad del año 2021 para la evaluación del plan RCM actual sin el programa de lubricación.
2. Definir los límites de admisibilidad para los parámetros Sacode (salud, contaminación y desgaste), mediante el análisis de un aceite nuevo y las características técnicas, para la línea base de cada sistema hidráulico.
3. Detallar las acciones de control según el modo de fallo asociadas con el programa de lubricación que estén en sinergia con los demás programas de mantenimiento, mediante recomendaciones del fabricante, expertos y teoría, para una precisa determinación de la causa raíz, lo que garantiza una alta disponibilidad del sistema.
4. Detallar los costos de planificación, implementación y cierre, asociados con el plan de mantenimiento basado en lubricación, mediante cotizaciones y creación

de una línea base de costos, para la inversión total necesaria de las centrales de generación bajo la administración de Coopelesca R. L.

2 Cap. II. Marco teórico referencial

2.1 Información de la empresa

“La Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos, COOPELESCA R.L., fundada el 24 de enero de 1965, con un área de concesión de 4770 km² que abarca los cantones de San Carlos, Sarapiquí, Grecia, Alajuela, Los Chiles y San Ramón” (Coopelesca R. L., 2020, s. p.).

En la actualidad, esta Cooperativa es líder en generación y distribución de energía eléctrica, además de telecomunicaciones. La entidad cuenta con cinco centrales hidroeléctricas que producen 84 MW y un parque solar de 5 MW. Las centrales son CH Chocosuela, CH Cubujuquí, CH Platanar, CH La Esperanza y CH Aguas Zarcas. De igual manera, durante el presente trabajo la Cooperativa se encuentra tramitando la compra de una sexta central hidroeléctrica ubicada en Sarapiquí, que no será involucrada, CH Doña Julia y se encuentra aguas arriba de la CH de Cubujuquí, por lo que se convertirá en un complejo hidroeléctrico con dos centrales en cascada.

2.2 Centrales hidroeléctricas

Según la Fundación Endesa (2013): “Una central hidroeléctrica aprovecha las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía eléctrica” (s. p.). En términos resumidos, su función es la de transformar esa energía cinética en mecánica, para que la tome el conjunto turbogenerador y se produzca energía eléctrica.

2.2.1 Sala de máquinas

En este lugar se sitúa el conjunto turbogenerador, los componentes de regulación y control de la central hidroeléctrica. Además de los equipos y el sistema de lubricación en los cuales se enfoca el proyecto.

Válvulas: Estos son los dispositivos encargados de controlar y regular la circulación del agua por las tuberías (Fundación Endesa, 2013).

Turbina: Encargadas de transformar la energía cinética de una corriente de agua en energía mecánica (Fundación Endesa, 2013).

Generador: Es el encargado de tomar la energía mecánica y transformarla en energía eléctrica (Fundación Endesa, 2013).

Figura 1. Sistema turbogenerador de la CH Chocosuela



Nota: La figura evidencia el sistema turbogenerador de la central hidroeléctrica de Chocosuela 1.

2.3 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El objetivo fundamental de la implantación de un mantenimiento centrado en confiabilidad es el de: “Disminuir el tiempo de parada de planta por averías imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción y además aumentar la disponibilidad de los equipos” (Ingeniería de Mantenimiento Industrial y servicios Integrales de Lubricación, 2010, s. p.).

El RCM se basa en manifestar todos los fallos potenciales que puede tener una instalación o sistema, identificar las causas que lo provocan y con esto determinar las medidas preventivas para evitar estos fallos. En la implementación del mantenimiento que se basa en confiabilidad la cantidad de total de fallas no cambia, lo que cambia es el balance entre los problemas que se vuelven severos y aquellos moderados o de consecuencias menores.

2.4 Fundamentos de indicadores del RCM

Para el proyecto es necesario determinar estos indicadores numéricos para establecer la confiabilidad del sistema antes y después de la implementación del plan de lubricación. Lo anterior ya que: “Permiten valorar de una manera cuantitativa y objetiva la gestión que realiza el mantenimiento desde diferentes aspectos” (Zeas, 2017, s. p.).

2.4.1 MTBF (tiempo medio entre fallos)

La fórmula es la siguiente:

$$MTBF = \frac{\text{Horas totales}}{\text{Número de fallas}}$$

2.4.2 MTTR (tiempo medio de reparación)

La fórmula es la siguiente:

$$MTTR = \frac{\text{Horas de paro por falla}}{\text{Número de fallas}}$$

2.4.3 Disponibilidad

La fórmula es la siguiente:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$$

2.4.4 Mantenibilidad

La fórmula es la siguiente:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Donde:

$$\mu = \text{Tasa de reparaciones} = \frac{1}{MTTR}$$

t = Tiempo

2.4.5 Tasa de fallos

La fórmula es la siguiente:

$$\lambda = \frac{F}{Tp}$$

Donde:

F = Número de fallos en un periodo de análisis

Tp = Periodo de análisis

2.4.6 Confiabilidad

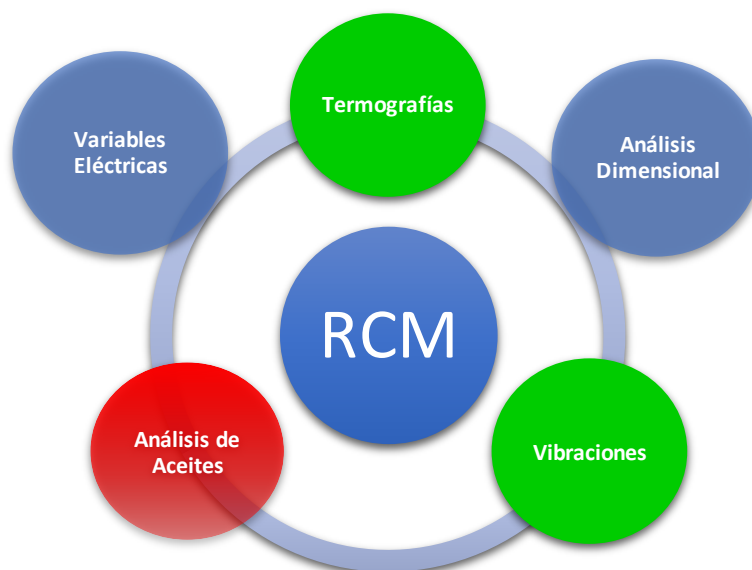
La fórmula es la siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

2.5 Tecnologías del RCM

Las tres tecnologías consideradas como: “Las que brindan el mayor retorno de inversión son: el análisis de aceite, el análisis de vibraciones y la termografía” (Wenzel y Lilly, 2016, s. p.). Estas tres tecnologías son fundamentales para obtener una correcta evaluación de la condición de los equipos, sin embargo, las centrales hidroeléctricas de Coopelesca no cuentan con un programa de lubricación (ver Figura 2).

Figura 2. Programas de RCM



En la Figura 2 se evidencian los principales programas de RCM mencionados, mientras que el análisis dimensional y las variables eléctricas son programas de estudio extra que se pueden implementar en las centrales hidroeléctricas.

2.5.1 Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones analiza diversas tendencias de onda y reconoce patrones de comportamiento para predecir e identificar anomalías mecánicas (Wenzel y Lilly, 2016). Los tipos de fallas que busca el espectro son entre algunas otras:

- Falla de rodamiento por desalineación
- Falla de acoplamiento
- Desbalanceo
- Resonancias
- Lubricación
- Estructura
- Engranajes

La aplicación de esta técnica en el mantenimiento predictivo mejora la eficiencia y fiabilidad de la máquina.

2.5.2 Termografías

La termografía se encarga de detectar patrones de calor y mide temperaturas de los componentes eléctricos y mecánicos. Además, puede identificar un punto caliente debido a la resistencia eléctrica, fricción o conexiones flojas (Wenzel y Lilly, 2016).

- Rodamientos
- Acoplamientos
- Intercambiadores de calor
- Electricidad

2.5.3 Análisis de aceite

De acuerdo con Wenzel y Lilly (2016): “El análisis de aceite examina las propiedades del fluido, los contaminantes y diversos tipos de partículas de desgaste” (s. p.). Además, Noria Corporation (2018): indica: “El análisis de aceite se compara con el análisis de la sangre en el cuerpo humano, y más del 70% de las fallas están relacionadas al lubricante” (s. p.).

Una gran ventaja es que detecta problemas, tanto en el fluido como en la máquina y puede encontrar defectos antes que las otras tecnologías mencionadas dentro del RCM.

Por ejemplo:

- Presencia de fluidos o contaminantes extraños
- Condición física y química del fluido
- Presencia de material de desgaste de la máquina, cantidad, tipo y morfología
- Rodamientos con desgaste

Además, el principal propósito del aceite lubricante es:

- Controlar la fricción
- Controlar el desgaste
- Controlar la corrosión
- Controlar la temperatura
- Controlar la contaminación

En la Figura 3 se observa que el análisis de aceite y el análisis de vibraciones tienen ventajas y desventajas que varían según el equipo y la falla por evaluar.

Figura 3. Fortalezas y debilidades del análisis de vibraciones vs. el análisis de aceite

Condición de la máquina	Análisis de aceite	Análisis de vibraciones	Correlación
Rodamientos lubricados por aceite	Fortaleza	Fortaleza	El análisis de aceite puede detectar condición de inicio de falla. Análisis de vibraciones brinda información de falla en etapa avanzada.
Cojinetes lubricados por aceite	Fortaleza	Mixta	Se generarán partículas de desgaste en el aceite antes que se presente una condición de holgura considerable.
Desbalanceo	N/A	Fortaleza	El análisis de vibraciones puede detectar desbalanceo. El análisis de aceite detectará eventualmente el efecto del incremento de carga en el rodamiento.
Agua en el aceite	Fortaleza	N/A	Análisis de aceite puede detectar agua en el aceite. Análisis de vibraciones tiene pocas probabilidades de hacerlo.
Rodamientos lubricados por grasa	N/A	Fortaleza	Algunos laboratorios no cuentan con suficiente experiencia para analizar grasas. Análisis de vibraciones puede detectar problemas de engrase.
Eje dañado	N/A	Fortaleza	Análisis de vibraciones es muy efectivo para diagnosticar un eje dañado o fracturado.
Desgaste en engranajes	Fortaleza	Fortaleza	Análisis de aceite puede predecir el modo de falla. Análisis de vibraciones puede predecir cuál engranaje está dañado.
Alineación	N/A	Fortaleza	Análisis de vibraciones puede detectar desalineación. Análisis de aceite eventualmente verá los efectos del incremento de carga en el rodamiento.
Condición del lubricante	Fortaleza	N/A	Análisis de aceite puede determinar lubricación inadecuada.
Resonancia	N/A	Fortaleza	Análisis de vibraciones puede detectar resonancia. Análisis de aceite eventualmente verá el efecto.
Causa raíz	Fortaleza	Fortaleza	Los mejores resultados se logran integrando análisis de aceite y análisis de vibraciones.

Fuente: Noria Corporation (2018).

Entre lo más importante por destacar está que, aunque cada tecnología presenta grandes ventajas, es la correlación y la sinergia entre ellas lo que verdaderamente logra obtener una valoración real del estado y condición de los equipos dentro del sistema de mantenimiento RCM. A la vez, la importancia de conocer las fortalezas y debilidades de cada tecnología es para seleccionar las que se adapten mejor a los modos de falla de las máquinas en estudio, como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Fortalezas y debilidades de las distintas tecnologías dentro de un RCM

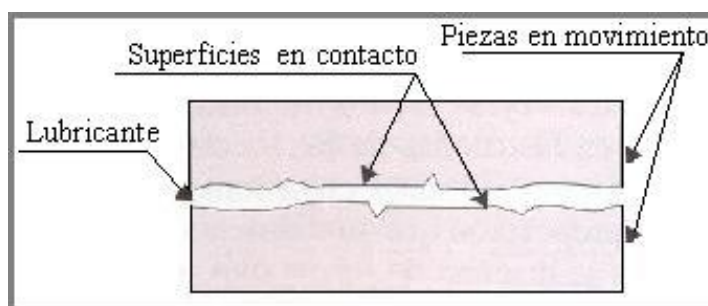
Tecnología de Monitoreo de Condición					
Modo de Falla	Análisis de Aceite	Análisis de Vibraciones	Termografía	Ultrasonido	
1	Inicio de falla de un rodamiento	3	4	2	4
2	Inicio de falla de cojinete	3	3	1	2
3	Desbalance	3	4	1	1
4	Agua en aceite	4	1	1	1
5	Problemas en rodamientos engrasados	2	3	1	4
6	Roturas de ejes	1	3	2	1
7	Desgaste anormal de engrane	3	3	1	2
8	Desalineamiento	2	4	2	1
9	Altas concentraciones de partículas en el aceite	4	1	1	1
10	Resonancia	1	4	1	1
11	Oxidación del aceite o degradación de aditivos	4	1	1	1
12	Uso del aceite erróneo	4	1	1	1
13	Solturas	1	4	1	1
14	Problemas eléctricos en motores	1	3	3	3
15	Problemas eléctricos en tableros	1	1	4	3
16	Sobrelubricación (Grasa)	1	2	3	4
17	Falta de lubricante (Grasa)	1	3	2	4

4	Excelente detección (Fortaleza)	3	Buena detección temprana
2	Detección tardía	1	No aplica (Debilidad)

Fuente: Noria Corporation (2018).

2.6 Tribología

La tribología es la ciencia que involucra el estudio de la fricción, lubricación, el desgaste y otros puntos que se relacionan con la interacción entre dos cuerpos en procesos dinámicos o estáticos. Un sistema tribológico es cuando: “Está compuesto por mínimo dos cuerpos naturales o artificiales que se encuentran en contacto móvil, lo cual genera un fenómeno llamado fricción” (Torres, 2014, s. p.).

Figura 5. Ejemplo didáctico de la lubricación entre dos superficies en contactos

Fuente: Soutullo (2021).

2.6.1 Desgaste

Se trata del fenómeno que sucede dentro del sistema tribológico como la pérdida progresiva de material en la zona de contacto entre dos superficies, sometidas a cargas y movimiento. Muchos de los distintos tipos de desgaste suceden por una mala selección del lubricante, por la pérdida de propiedades o la contaminación del lubricante.

2.6.2 Lubricación

La lubricación es un factor de suma importancia dentro del sistema tribológico, una selección adecuada del aceite evita el rozamiento de los cuerpos, así como su fricción y posible desgaste. Algunas características importantes de los lubricantes que se deben tomar en cuenta y que no se pueden desatender son:

- Viscosidad:

Es uno de los parámetros más importantes de un aceite. Existen factores a tener en cuenta a la hora de elegir la viscosidad adecuada para una determinada aplicación. Algunos factores que tienden a requerir viscosidades altas son abrasivos en el aceite, cargas de impacto, bajas velocidades y alta temperatura de operación (Pistarelli, 2013, s. p.).

- Acidez: Es la degradación de un aceite como consecuencia de la operación a altas temperaturas y diferentes esfuerzos. Se puede observar en la formación de lodos, corrosión, disminución de la viscosidad y formación de depósitos de carbón en piezas mecánicas (Martínez López, 2014).
- Basicidad: También viene dada por la degradación del aceite, en sentido opuesto es la encargada de contrarrestar los efectos de la acidez. Todo lubricante nuevo presenta un índice de basicidad alto al inicio.

Algunos componentes entre los lubricantes se encuentran:

- Detergentes-dispersantes: Aditivo que tiene la finalidad de evitar que el mecanismo que se esté lubricando se contamine con sustancias extrañas, aunque el aceite lo esté. El agente dispersante ayuda a que las sustancias extrañas no se acumulen. Algunos ejemplos son zinc, calcio y bario-azufre, cloro y fósforo (Martínez López, 2014).
- Anticorrosivos-antioxidantes: Aditivos que ayudan en la protección de la corrosión para las piezas mecánicas e impedir la alteración del aceite por degradación a causa del envejecimiento y oxidación. Algunos ejemplos son nitrofosfato de zinc y los esteres del ácido etilfosfórico (Martínez López, 2014).
- Mejoradores del índice de viscosidad: Para mantener una adecuada viscosidad se utilizan los: “Esteres del ácido polimetacrílico y soluciones de materiales plásticos que elevan en un porcentaje pequeño la viscosidad” (Martínez López, 2014, p. 35).
- Anti—desgaste: “Estos crean una película protectora sobre las piezas mecánicas actuando sobre ellas, previniendo así el desgaste, algunos aditivos usados son: alquilo – fosfatos de zinc y derivados fosforados” (Martínez López, 2014, p. 36).
- Anticorrosivos:
Este aditivo tiene como fin evitar el daño a las piezas metálicas ferrosas, debido al contacto entre el óxido formado por el agua y el oxígeno del aire, este actúa formando una película protectora sobre la pieza metálica; son utilizadas las sales de sodio, magnesio y calcio (Martínez López, 2014, p. 36).
- Aditivos de extrema presión: Aditivo: “Usado para evitar el desgaste en piezas metálicas debido a las altas cargas, favoreciendo el deslizamiento y la

adherencia del aceite a la pieza metálica” (Martínez López, 2014, p. 36).

Aditivos como fosforo-azufrados y derivados organometálicos del molibdeno.

2.7 El análisis de aceite

El análisis de lubricantes es una herramienta que permite el monitoreo del equipo y su estado condición. Esta evaluación permite determinar la causa raíz de la falla. De acuerdo con Noria Corporation (2018):

Las partículas de desgaste en el aceite pueden evaluarse microscópicamente para establecer los posibles mecanismos de falla como fatiga, abrasión o falla del lubricante. Esta información frecuentemente puede correlacionarse con una causa tal como la desalineación, desbalanceo o solturas mecánicas (s. p.).

Un programa de lubricación de excelencia no emplea lubricación por rutina, sino que se basa en la *condición* del propio lubricante, lograda a través de las distintas variables que mostrará el análisis de aceite.

2.8 Normas en el análisis de aceite

Según Losada (2006): “En el mundo existen diversos métodos y normas de ensayos en lubricantes como: ASTM, API, IP, INTA, DIN, MII y otros” (s. p.). En el presente proyecto se toma como referencia lo estipulado en las normas ASTM, las cuales evidencian el método y la guía de las pruebas más notorias en el análisis de aceite.

2.8.1 Clasificación del aceite según Norma ISO

Los aceites se clasifican según su grado de viscosidad y, de esta forma, su capacidad de desempeño. El sistema ISO clasifica los aceites en Centistokes (cSt) a 40 °C, donde este sistema representa mayor facilidad para su identificación en los productos. “Siempre es conveniente analizar la viscosidad del aceite nuevo, porque las normas internacionales

toleran un +/- 10% de error en los valores indicados por el fabricante” (León Lecca, 2017, p. 27).

Figura 6. Tabla de viscosidad Norma ISO y sus tolerancias +/-10%

Tabla de viscosidad DIN 51519			
Viscosidad ISO	Viscosidad a 40 °C [mm ² /s]	Límites de viscosidad	
Nominal	Media	Mínima	Máxima
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11
ISO VG 15	15	13.50	16.5
ISO VG 22	22	19.80	24.2
ISO VG 32	32	28.80	35.2
ISO VG 46	46	41.40	50.6
ISO VG 68	68	61.20	74.8
ISO VG 100	100	90.00	110
ISO VG 150	150	135.00	165
ISO VG 220	220	198.00	242
ISO VG 320	320	288.00	352
ISO VG 460	460	414.00	506
ISO VG 680	680	612.00	748
ISO VG 1000	1000	900.00	1100
ISO VG 2200	2200	1,980.00	2420
ISO VG 3200	3200	2,880.00	3520

Fuente: Widman International SRL.

2.9 Pruebas del análisis

Viscosidad a 40 °C y 100 °C. Los estándares según Noria Corporation son (2018): “Viscosidad cinemática (resistencia a fluir y al corte por la fuerza de la gravedad) o viscosidad absoluta (la resistencia interna a fluir y al corte por la fuerza aplicada, también conocida como viscosidad dinámica)” (s. p.). Lo mejor es medir la viscosidad de un aceite lo más cercano a su temperatura de operación. Este criterio permite que el lubricante funcione como barrera de separación entre el cojinete y el eje, además del funcionamiento correcto en el sistema de regulación.

Índice de viscosidad. Este describe la variación de la viscosidad por efecto de cambios en la temperatura. Su importancia radica cuando existen temperaturas oscilantes de operación.

Número ácido (AN). “Es la cantidad de ácidos y sustancias ácidas en el lubricante” (Noria Corporation, 2018, s. p.). Un incremento del AN puede indicar oxidación severa del aceite, agotamiento de aditivos, adición de aceite incorrecto y esta se puede representar como aumentos en la cantidad de sedimentos en cuba y filtros. Por este motivo, debe tener un monitoreo estrecho.

Número básico (BN). Según Noria Corporation (2018): “Esta es una propiedad más asociada a aceites de motor que a aceites industriales. Se define como la capacidad de un lubricante para neutralizar los ácidos que se producen durante su servicio” (s. p.). Al disminuir el BN puede significar un aumento de la oxidación y agotamiento de aditivos.

Punto de inflamación: De acuerdo con Noria Corporation (2018):

Mide la tendencia de un aceite a formar una mezcla inflamable con el aire. A menudo se considera una prueba previa para aceite nuevo, el punto de inflamación también se puede utilizar en el análisis de aceite usado para detectar la dilución

con combustible, la degradación térmica de la base lubricante y la contaminación (s. p.).

Demulsibilidad mecánica. Esta propiedad está relacionada con evaluar la capacidad del aceite de separarse del agua y evitar formar una emulsión. Una pérdida de emulsibilidad por parte del aceite indica que:

El aceite se ha contaminado o degradado lo suficiente como para favorecer la formación de emulsiones. Esta afectación puede deberse a la presencia de sustancias polares, como tierra, barniz, metales, lodos, resinas, grasas, etc. Por otra parte, le indica cuál es el riesgo actual de que la película lubricante se vea afectada a causa de la emulsión presente entre los componentes en movimiento relativo (Corona, 2021, s. p.).

Según Noria Corporation (2018):

El formato es: X/X/X (X). Esto se relaciona con la cantidad de aceite/agua/emulsión y el tiempo (en minutos) para lograr dicho nivel de separación. El mejor resultado sería 40/40/0 en 5 min, indicando una rápida separación completa. El 0/0/80 sería el peor resultado posible. En este caso, el aceite y el agua nunca se separaron, y lo que quedó fue una emulsión estable; el agua emulsionada se considera la más destructiva (s. p.).

Oxidación por FTIR. La oxidación se debe a la presencia de agua y metales reactivos, esta aumenta la viscosidad y acidez del aceite y tiene lugar la formación de herrumbre y corrosión. A mayor desgaste de los componentes por corrosión, mayor potencial de barniz y acumulación de lodo:

De acuerdo con Noria Corporation (2018): “La Espectrometría Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) es la prueba identificada en el estándar ASTM E2412. Esta es utilizada para revisar las tendencias de varias formas moleculares representadas

en un espectro” (s. p.). Noria Corporation (2018) también señala que: “El FTIR estará más enfocados [sic] en las propiedades de los fluidos. El agotamiento de aditivos y la oxidación son dos ejemplos típicos al aplicar FTIR” (s. p.) (ver Anexo 1). Estos óxidos se presentan en la región de absorbancia de 1800 cm^{-1} a 1670 cm^{-1} del espectro.

Nitración por FTIR. Este fenómeno ocurre cuando los compuestos de nitrógeno y oxígeno son expuestos a altas temperaturas y presiones, convirtiéndose en óxidos nitrosos. Estos óxidos o la nitración producen un incremento en la viscosidad del aceite y el número ácido, además de ser la principal fuente de depósitos de barniz y lacas. Los productos nitrogenados se monitorean por FTIR en el incremento de la absorbancia IR entre 1650 cm^{-1} y 1600 cm^{-1} .

Sulfatación por: Noria Corporation (2018) indica:

Estos compuestos incrementan la producción de barniz y lodos, generalmente degradan el aceite. Igualmente, reaccionan con el agua formada durante el proceso de combustión para generar ácidos orgánicos fuertes como en sulfúrico. Los productos de sulfatación son medidos por FTIR de la misma forma que los de oxidación y nitración, monitoreando el incremento de la absorbancia IR entre 1180 cm^{-1} y 1120 cm^{-1} (s. p.).

.

Aditivos por el método molecular. Esta determina la concentración de moléculas (no metales o átomos). La concentración molecular se mide directamente y la descomposición del aditivo se evidencia de inmediato, como el ejemplo de la hidrólisis del ZDDP (uno de los aditivos más comunes). Según Noria Corporation (2018):

La espectrometría molecular es una herramienta muy adecuada para determinar la concentración de moléculas orgánicas.

El término cubre una gran cantidad de técnicas analíticas. Algunas comunes como infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR); otras como resonancia magnética nuclear (NMR), cromatografía de gases juntamente con espectrometría de masa (GC-MS) y cromatografía líquida con FTIR (LC-FTIR) no son tan comunes (s. p.).

Aditivos por método atómico (AES): Noria Corporation (2018) afirma lo siguiente:

La espectrometría de elementos metálicos es a veces llamada espectrometría atómica. Usando el método del electrodo de disco (RDE) o el de plasma inductivamente acoplada (ICP), elementos como el zinc, fósforo, calcio, boro y magnesio, pueden ser medidos y monitoreados para proporcionar un indicativo de la concentración. Sin embargo, tiene dos limitaciones en cuanto al monitoreo de los aditivos. En primer lugar, esta técnica no determina directamente el aditivo, sólo el elemento individual o átomo que contiene la molécula del aditivo. La segunda, muchos aditivos como los antioxidantes, dispersantes, mejoradores del índice de viscosidad y algunos antiespumantes son moléculas orgánicas, las cuales no son detectadas por este método (s. p.).

Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER). La rutina de evaluación de la vida útil estudia la oxidación en relación con la cantidad de antioxidante que queda en el lubricante. Este parámetro se mide utilizando la prueba ASTM D6971. La norma ASTM D4378 sugiere un límite de advertencia de menos del 25 % del nivel de antioxidante del lubricante nuevo en turbinas de vapor y gas. Por otro lado, Noria Corporation (2018) menciona un 50 % en equipo industrial como valor sugerido.

Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT). En la prueba de oxidación en recipiente rotatorio presurizado los mecanismos de falla asociados con bajos resultados de RPVOT son los depósitos de barniz que se forman. Se debe considerar reemplazar un

lubricante en servicio cuando los resultados de RPVOT alcancen menos del 25 % del valor del lubricante nuevo, combinado con un alto número ácido (AN). Por sí solo el RPVOT no es buen indicador de salud del aceite.

- Valores de >55% están dentro de los límites aceptables para el método y no se necesita ninguna acción.
- Valores de 55-45% se recomienda aproximadamente la mitad de los productos de partida vida y edulcorante.
- Los valores de 44-26% indican baja estabilidad oxidativa. La posibilidad de que la formación de lodos y la decoloración es probable; se recomienda endulzar el sumidero.
- Valores de <25% es una indicación de que la estabilidad oxidativa es extremadamente baja y el cambio de lubricante es aconsejable (Hepley, 2018, s. p.).

Potencial para generar barniz (MPC). Colorimetría de micromembrana, diseñada para capturar cualquier presencia de barniz que es soluble con el aceite. La escala de colores y la gravedad es la siguiente, según Hepley (2018):

- 0-14.99: Gravedad 0 - Muy bajo potencial para la formación de barniz.
- 15-19.99: Gravedad 1 - Menor potencial para la formación de barniz.
- 20-29.99: Gravedad 2 - Potencial moderado para la formación de barniz.
- 30-39.99: Gravedad 3 - Un gran potencial de la formación de barniz. Se deben tomar medidas preventivas para detener la formación continua de barniz.
- >40: Gravedad 4 - Formación grave y evidente de barniz en el sistema y se deben tomar medidas para eliminar el barniz (s. p.).

De acuerdo con Noria Corporation (2018):

El barniz produce un depósito grueso, similar a una película, que pueden causar adhesión y falla de la máquina. incrementar el riesgo de falla al restringir el flujo de aceite y el movimiento de los componentes, obstruyendo filtros y reduciendo la transferencia de calor. Algunos factores que contribuyen al barniz son el calor, el aire, la humedad y diversos contaminantes (s. p.).

Concentración de agua. Las fallas ocasionadas por la contaminación con agua pueden ser catastróficas, pero pueden no ser inmediatas.

- Reducción de la vida del componente debido a herrumbre y corrosión
- Erosión/ataque químico por agua y cavitación vaporosa
- Fragilización por hidrógeno
- Corrosión en cojinetes
- Oxidación del babbitt de cojinetes

El método más confiable es ASTM D6304. La muestra de aceite se calienta bajo un vacío, de modo que cualquier cantidad de agua presente en la muestra se evapora. Los vapores de agua se condensan y disuelven en tolueno y es entonces que se titula.

Concentración de combustible. El combustible en los aceites disminuye la concentración de aditivos. Esta prueba se enfoca principalmente en motores de combustión.

Concentración de glicol. Glicol es el componente principal del anticongelante, este contiene aditivos como potasio. Este elemento (junto con el sodio) se convierte en un indicador común de la contaminación por glicol. Este análisis también se enfoca en motores de combustión.

Concentración de hollín. El hollín es el resultado de la combustión incompleta del combustible diésel más otros contaminantes, su naturaleza se compone de partículas

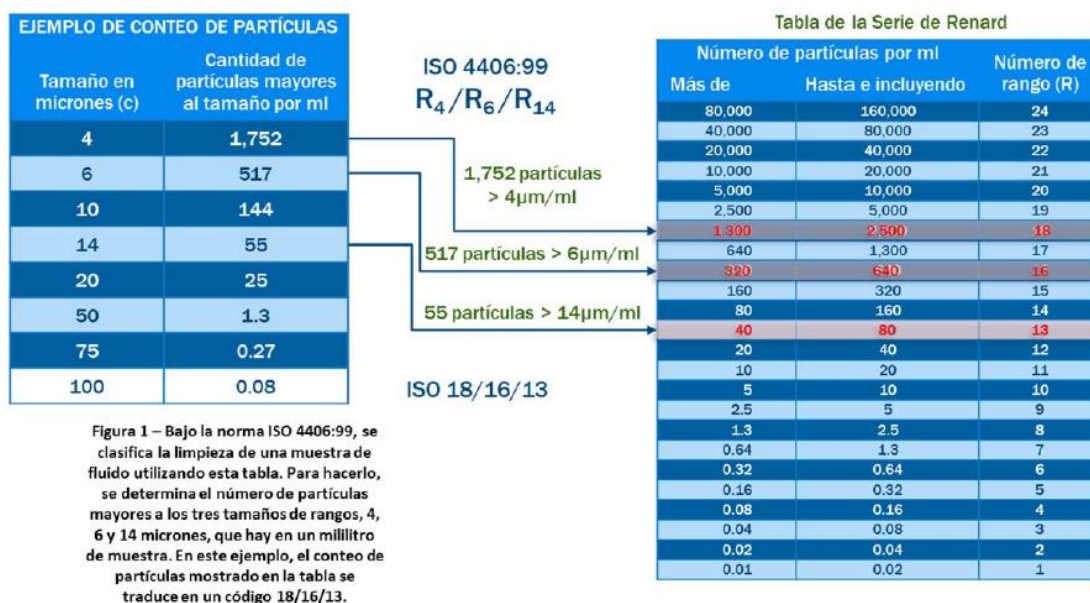
sólidas de tamaño muy pequeño, pero muy abrasivos y dañinos para motores de combustión.

Conteo de partículas sólidas. “La contaminación por partículas en los aceites es la causa número uno de fallas en los equipos relacionados con el lubricante” (Noria Corporation, 2018, s. p.).

La contaminación por partículas sólidas puede venir de la tierra, chispas de pintura, fibras de trapos, material de los sellos, partículas de desgaste, partículas de corrosión y partículas propias del proceso, las cuales pueden ingresar del exterior o que se generan por la máquina. Según Noria Corporation (2013):

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) ha desarrollado un código de contaminación sólida, el cual es el dato principal a revisar en la mayoría de los reportes de resultados de análisis de aceites industriales. El valor de este código puede ayudar a determinar el nivel general de limpieza de un sistema bajo monitoreo (s. p.).

Este código es el ISO 4406: 99, el cual mide los niveles de contaminación en 3 diferentes rangos, 4 micrones, 6 micrones y 14 micrones, como se muestra en la Figura 7:

Figura 7. Definición de rangos ISO 4406:99 y ejemplo

Fuente: Noria Corporation (2013).

Contaminantes por método atómico: Noria Corporation (2018) señala:

La espectrometría de elementos metálicos es a veces llamada espectrometría atómica. Usando el método del electrodo de disco (RDE) o el de plasma inductivamente acoplada (ICP), elementos como el zinc, fósforo, calcio, boro y magnesio, pueden ser medidos y monitoreados para proporcionar un indicativo de la concentración (s. p.).

Es posible el monitoreo de parámetros que se relacionan con:

- Subproductos de oxidación
- Ocurrencia de nitración
- Hollín
- Ocurrencia de sulfatación
- Contaminación por anticongelante y glicol
- Nivel de ZDDP (dialquil zinc ditio fosfato, un aditivo importante)
- Contaminación por combustible en el aceite lubricante

- Contaminación por agua

Concentración de partículas ferromagnéticas (DRF). De acuerdo con Tribologik (s. f.):

La ferrografía de lectura directa mide la cantidad de detritos ferrosos de desgaste en una muestra de aceite. Los resultados del DRF dan la cantidad de partículas tanto mayores a 1 micrón y menores a 5 micrones de tamaño en una muestra de aceite de 1 ml. El valor índice, la concentración de partículas totales de desgaste (WPC) y el porcentaje de partículas grandes (PLP) (s. p.).

Solo mide partículas ferromagnéticas y para ser decisiva requiere de un análisis posterior de ferrografía analítica.

Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ). Tribologik (s. f.) señala lo siguiente:

El ensayo índice cuantificador de partículas mide la masa de detritos de desgaste ferroso en una muestra y lo demuestra como un índice PQ por Efecto Hall sin importar el tamaño de la partícula. El índice PQ es un numero [sic] cuantitativo adimensional y puede ser tomado como tendencia con aceptable linealidad en un amplio espectro de contenido de detritos ferrosos y tamaños de partículas. Cuanto más grande el índice, más alto el contenido de desgaste ferroso (s. p.).

Concentración de metales de desgaste (AES). Según A-MAQ S. A. (2015):

El principio básico consiste en someter la muestra de lubricante a una fuente alto voltaje (15 kV) en la cual se calienta y libera energía. Fenómenos especiales de radiación se generan, en los cuales se pueden diferenciar y asignar las radiaciones a diferentes frecuencias a elementos específicos constituyentes del lubricante (s. p.).

Los proveedores cuentan con tablas de valores máximos de elementos permisibles que se relacionan con el tipo de máquina y el proceso productivo.

Identificación de características de partículas por método ferrografía analítica. De acuerdo con A-MAQ S. A. (2015):

Esta se posiciona como una de las técnicas más importantes para el análisis de aceite. Provee gran información de causa raíz, es bastante costosa. Además, es una prueba que requiere tiempo, paciencia y alta habilidad (muy buen ojo) por parte del analista (s. p.).

Se identifican seis categorías de partículas:

1. Partículas blancas no ferrosas: con frecuencia son aluminio o cromo.
2. Partículas de cobre.
3. Partículas del babbitt.
4. Contaminantes: por lo general son residuos de polvo principalmente silicio.
5. Fibras: causadas por desprendimientos de filtros y contaminación externa.
6. Partículas ferrosas: Se dividen en cinco diferentes categorías:
 - Acero de alta aleación: Su aparición en ferrogramas es rara (es lo último que se espera que se desgaste).
 - Acero de baja aleación.
 - Óxidos metálicos negros: La cantidad de negro determina la severidad de oxidación.
 - Fundición de hierro.
 - Óxidos rojos (herrumbre): Una gran cantidad de óxidos rojos de pequeño tamaño en la salida de la plaqueta se consideran como un signo de desgaste corrosivo. Aparece como una playa de arena roja (A-MAQ S. A., 2015).

Normalmente, la forma de la partícula es una clave importante sobre el origen del desgaste donde las partículas laminares indican aplastamiento en las áreas de rodamientos por alta presión o contacto lateral. Según A-MAQ S. A. (2015):

Si la partícula tiene una forma curva similar a una hoz, esto caracteriza desgaste cortante producido por contaminantes abrasivos. La partícula con estrías en su superficie son signos de desgaste por arrastre sin lubricación y puede ser generado en un área donde ocurren arranques de superficies metálicas (s. p.).

Las partículas esféricas oscuras con centro blanco se generan en presencia de fatiga en los rodamientos, un incremento en ellas indica exfoliación.

2.10 Técnica Sacode

Normalmente, el análisis de aceite no representa un gran beneficio en muchas industrias y esto se debe a varias causas posibles como:

- Puertos de muestreo incorrectos
- Toma de muestras no-representativas
- Procedimientos inadecuados
- Botellas de muestreo contaminadas
- Pruebas inadecuadas
- Preparación inadecuada de la muestra para su análisis
- Uso de solventes y reactivos contaminados
- Instrumentos no calibrados
- Personal analista no clasificado
- Errónea interpretación de los resultados de análisis (Noria Corporation, 2018).

Lo anterior representa cuantiosas pérdidas de tiempo, energía y recursos. Por este motivo, en el presente proyecto y de acuerdo con el experto en lubricación Noria (2006), se maneja a través del seguimiento sistemático del método de interpretación Técnica Sacode, el cual facilita la interpretación y estandarización del diagnóstico en el AA. Algunas definiciones importantes y parámetros por llevar a cabo en esta técnica son:

Salud: “Aquellos cambios relacionados con el aceite en sí, por ejemplo: viscosidad, contenido de aditivos (fósforo, zinc, calcio, magnesio, bario, etc.), número ácido, oxidación, sulfatación, nitración, punto de inflamación, índice de viscosidad, número básico, etc.” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Contaminación: “Todos aquellos contaminantes presentes en el lubricante, tales como: partículas de tierra y polvo (silicio), agua, solventes, combustibles, materiales del

proceso (cemento, hierro, plástico, etc.), otros aceites lubricantes, hollín, refrigerante, etc.” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Desgaste: “Partículas procedentes de la maquinaria y equipo, como hierro, cobre, estaño, aluminio, cromo, etc.” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Línea base: De acuerdo con Noria Corporation (2006):

Las características originales del aceite nuevo que se utilizará en la lubricación del equipo (por ejemplo, viscosidad, AN, BN, contenido de aditivos -fósforo, zinc, calcio, magnesio, boro, silicio y RPVOT para aceites de turbinas, etc.). Es fundamental contar con la información de la línea base para poder implementar un programa de análisis de aceite efectivo (s. p.).

Límites de precaución: “Señalan una condición por sobre la cual se tiene una situación anormal y una acción es necesaria” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites críticos: “Señalan una condición por sobre la cual se tiene una situación crítica y se requiere tomar una acción inmediata” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites objetivos:

Aquellos que se establecen como un valor predeterminado que se está buscando, por ejemplo, niveles de limpieza: */13/10 para fluidos hidráulicos o contenido de agua máximo de 200 ppm para aceites de turbina, etc. Se aplica comúnmente a conteo de partículas, nivel de humedad, contaminación con glicol, dilución por combustible, AN y otras condiciones comunes de causa raíz de falla” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites de envejecimiento: “Grado máximo de acidez, de oxidación, de sulfatación, de nitración, de nivel de aditivos, etc.” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites de tasa de cambio: “Miden el cambio de una característica respecto al tiempo o al uso, por ejemplo: ppm Fe/hora, BN/km, etc.” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites estadísticos:

Límites basados en desviaciones de los promedios históricos bajo condiciones normalizadas. Se aplican para el desgaste metálico: se obtiene el valor promedio y la desviación estándar. Se establecen los límites de precaución como el valor promedio +1 desviación estándar y los críticos como el valor promedio +2 desviaciones estándar (Noria Corporation, 2006, s. p.).

Límites estadísticos derivados por tasa de cambio: “Límites basados en desviaciones de los promedios históricos de valores de tasa de cambio” (Noria Corporation, 2006, s. p.).

En la Figura 8 se muestran los parámetros de la técnica Sacode y algunos de sus modos de fallo por evaluar.

Figura 8. Parámetros de la técnica Sacode en el análisis de aceite

SALUD	CONTAMINACIÓN	DESGASTE
Degradación del lubricante (Oxidación)	Relleno con otro tipo de lubricante	Desgaste de componentes
Calentamiento extremo súbito del lubricante	Relleno con aceite contaminado con partículas	Componente mal ensamblado
Agotamiento de aditivos del lubricante	Contaminación con partículas solidas	Desalineamiento
Alta temperatura de operación del lubricante	Contaminación con agua	Desbalance
Lubricante de viscosidad incorrecta	Falla del sistema de enfriamiento	Carga excedida
Lubricante del tipo incorrecto	Falla del filtro de aceite	Corrosón de componentes
	Filtro de aceite en derivación	Ataque a metales ferrosos
	Falla del filtro respirador	Cavitación
	Contaminación con sellos de silicón	
	Contaminación con diesel	
	Contaminación con glicol	

Fuente: Noria Corporation (2018).

Por otro lado, en la Figura 9 se muestra la clasificación de las pruebas definidas previamente en cada parámetro de la técnica Sacode a la que responde.

Figura 9. Datos del análisis según la técnica Sacode

Enfoque	Prueba	Categoría
PROACTIVO	Viscosidad @ 100°C	SALUD
	Viscosidad @ 40°C	SALUD
	Índice de viscosidad	SALUD
	Número ácido (AN)	SALUD
	Número básico (BN)	SALUD
	Oxidación por FTIR	SALUD
	Nitración por FTIR	SALUD
	Sulfatación por FTIR	SALUD
	Determinación de aditivos por el método molecular - FTIR	SALUD
	Determinación de aditivos por el método atómico - Espectroscopía de emisión atómica (AES): Zn, P, Mg, Ca, Mo, B, Ti	SALUD
	Resistencia del lubricante a la oxidación (método RULER)	SALUD
	Resistencia a la oxidación (método RPVOT)	SALUD
	Determinación del potencial para generar barniz del lubricante	SALUD
	Determinación de concentración de agua en el lubricante	SALUD
	Determinación de concentración de combustible en el lubricante	CONTAMINACIÓN
	Determinación de concentración de glicol en el lubricante	CONTAMINACIÓN
	Determinación de concentración de hollín en el lubricante	CONTAMINACIÓN
	Conteo de partículas sólidas en el lubricante - Determinación del código de contaminación sólida	CONTAMINACIÓN
PREDICTIVO	Determinación de contaminantes por el método atómico - Espectroscopía de emisión atómica (AES): Si, Al, B, Na, K, V, Ba (otros metales del proceso o ambiente)	CONTAMINACIÓN
	Determinación de concentración de partículas ferromagnéticas por el método de Ferrografía de lectura directa (DR)	DESGASTE
	Concentración de partículas ferromagnéticas por el método de índice ferroso	DESGASTE
	Concentración de partículas ferromagnéticas por el método de cuantificador de partículas ferrosas - Índice PQ	DESGASTE
	Determinación de la concentración de metales de desgaste por el método atómico - Espectroscopía de emisión atómica (AES): Fe, Cu, Pb, Sn, Al, Sb, Ni, Cd, Cr, Ag	DESGASTE
	Identificación de las características de las partículas por el método de ferrografía analítica	DESGASTE

Fuente: Noria Corporation (2018).

2.11 Análisis de criticidad

El análisis de criticidad y el método AFME son primordiales, debido a que permiten determinar los equipos críticos en estudio y sus principales modos de falla, para su posterior determinación de pruebas y frecuencias, según la técnica Sacode. Las variables definidas para este análisis son seguridad, impacto productivo, costo de reparación y tiempo promedio de reparación, que se definen en escalas de 1 a 5, donde 1 se considera la consecuencia más leve y 5 la más crítica.

2.12 Análisis de modo de fallos AMFE

Como se mencionó previamente, este análisis es primordial para el planteamiento de un adecuado programa de lubricación. Su valor se puede apreciar en el documento del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España realizado por Bestratén Belloví y Orriols Ramos (2018):

AMFE identifica en primer lugar, el componente susceptible de averiarse, luego el modo de fallo dominante y a continuación sus efectos, tanto en el propio sistema como en la instalación y en el área de trabajo. Posteriormente se cuantifica la probabilidad de fallo y de ahí obtener las tareas de mantenimiento requeridas enfocándose en lo más crítico (s. p.).

Este permite la elaboración de estrategias y: “Planes de mantenimiento partiendo de las averías de cada sistema funcionando en su entorno o contexto operacional” (Lascano Constante, 2021, p. 12). La norma ASTM D7874 es la guía estándar para aplicar el AMFE a las pruebas de lubricante en servicio: “Sirve como una justificación inicial para seleccionar pruebas de fluidos y frecuencias de muestreo. Se requiere experiencia operativa de la planta junto con la revisión y evaluación comparativa de aplicaciones similares para garantizar que se implementen las lecciones aprendidas” (ASTM D7874-13, 2018, s. p.).

2.12.1 Índice de prioridad de riesgo IPR

El índice de prioridad de riesgo es el valor final que determina el impacto del modo de falla, según la gravedad, la frecuencia y la detección, ver siguiente fórmula y los valores de la Tabla 1:

$$IPR = Gravedad * Frecuencia * Detección$$

Tabla 1. Clasificación del IPR

$NPR > 200$	Inaceptable (I)
$200 > NPR > 125$	Reducción deseable (R)
$NPR < 125$	Aceptable (A)

Fuente: Bestratén Belloví y Orriols Ramos (2018).

Figura 10. Clasificación de la gravedad del modo de falla

GRAVEDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Baja Repercusiones imperceptibles	No es razonable esperar que este fallo de pequeña importancia origine efecto real alguno sobre el rendimiento del sistema. Probablemente, el cliente ni se daría cuenta del fallo.	1
Baja Repercusiones irrelevantes apenas perceptibles	El tipo de fallo originaría un ligero inconveniente al cliente. Probablemente, éste observaría un pequeño deterioro del rendimiento del sistema sin importancia. Es fácilmente subsanable	2 - 3
Moderada Defectos de relativa importancia	El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. El cliente observará deterioro en el rendimiento del sistema	4 - 6
Alta	El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.	7 - 8
Muy Alta	Modalidad de fallo potencial muy crítico que afecta el funcionamiento de seguridad del producto o proceso y/o involucra seriamente el incumplimiento de normas reglamentarias. Si tales incumplimientos son graves corresponde un 10	9 - 10

Fuente: Bestratén Belloví y Orriols Ramos (2018).

Figura 11. Clasificación de la frecuencia/probabilidad de ocurrencia del modo de falla

GRAVEDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Baja Improbable	Ningún fallo se asocia a procesos casi idénticos, ni se ha dado nunca en el pasado, pero es concebible.	1
Baja	Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Es razonablemente esperable en la vida del sistema, aunque es poco probable que suceda.	2 - 3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Probablemente aparecerá algunas veces en la vida del componente/sistema.	4 - 5
Alta	El fallo se ha presentado con cierta frecuencia en el pasado en procesos similares o previos procesos que han fallado.	6 - 8
Muy Alta	Fallo casi inevitable. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	9 - 10

Fuente: Bestratén Belloví y Orriols Ramos (2018).

Figura 12. Clasificación de facilidad de detección del modo de falla

GRAVEDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Alta	El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes	1
Alta	El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría en alguna ocasión escapar a un primer control, aunque sería detectado con toda seguridad a posteriori.	2 - 3
Mediana	El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente. Posiblemente se detecte en los últimos estadios de producción	4 - 6
Pequeña	El defecto es de tal naturaleza que resulta difícil detectarlo con los procedimientos establecidos hasta el momento	7 - 8
Improbable	El defecto no puede detectarse. Casi seguro que lo percibirá el cliente final	9 - 10

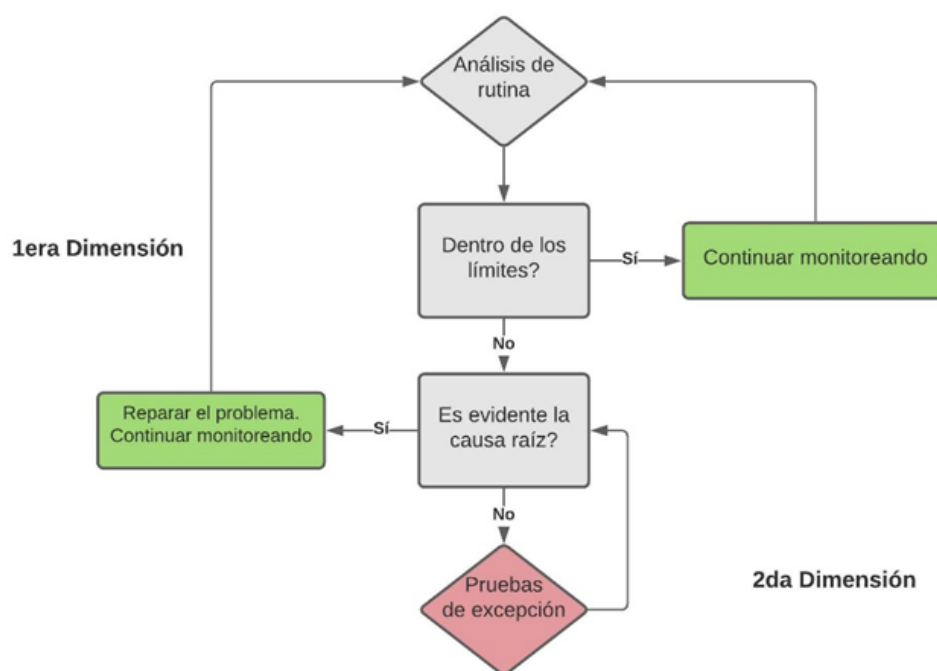
Fuente: Bestratén Belloví y Orriols Ramos (2018).

2.13 Dimensiones del análisis de aceite

Es importante definir específicamente el momento y en qué circunstancias se implementan las distintas pruebas. Lo anterior debido a que según Noria Corporation (2020):

El análisis de aceite puede apoyarse con conjuntos de prueba de rutina y de excepción. Los conjuntos de prueba de rutina incluirían el análisis de viscosidad, espectrometría de elementos, número ácido y la espectrometría infrarroja por transformadas de Fourier, mientras que los conjuntos de pruebas de excepción podrían consistir en medición de potencial de barniz, medición de oxidación, voltametría de escaneo lineal y pruebas de oxidación en recipiente rotativo a presión (RPVOT) (s. p.).

Figura 13. Diagrama de dos dimensiones aplicado al análisis de aceite



Fuente: Noria Corporation (2003).

2.14 Frecuencia de muestreo

Para determinar la frecuencia de los muestreos es necesario un análisis profundo del sistema, el entorno, criticidad del equipo y años de experiencia. Sin embargo, es posible estimar una frecuencia técnica con la herramienta generadora de frecuencia de los documentos de Noria.

Este es un: “Método sistemático para estimar la frecuencia de muestreo optimizada, teniendo en cuenta la penalización económica de la falla, la severidad del entorno del fluido, la edad de la máquina, la edad del aceite y la rigidez de los objetivos” (Noria Corporation, s. f., s. p.).

Además, es importante mencionar que la frecuencia de muestreo debe modificarse cuando existan valores del análisis fuera de los límites establecidos, cuando la máquina sea nueva o vieja según la curva de la bañera y cuando se esté llegando al final de la vida útil del lubricante.

Figura 14. Herramienta para determinación de la frecuencia

Sample Frequency Generator

1. Select 'Best Fit' Default Frequency

Bearings	500 hrs	Gearing, Low Speed	1000 hrs
Chillers	500 hrs	Hydraulics, Aviation	150 hrs
Compressors	500 hrs	Hydraulics, Industrial	700 hrs
Differentials	300 hrs	Hydraulics, Mobile	250 hrs
Engine, Aviation Recip	50 hrs	Transmissions	300 hrs
Engine, Diesel	150 hrs	Turbines, Aviation	100 hrs
Final Drives	300 hrs	Turbines, Gas	500 hrs
Gearing, Aviation	150 hrs	Turbine, Steam	500 hrs
Gearing, High Speed Industrial	300 hrs		

Write Default Here

Default

Hrs

2. Score Application Adjustment Factors

Economic Penalty of Failure - Circle Factor

Very High				Normal				Low	
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	

Consider downtime costs, repair costs and general business interruption penalty.

Fluid Environment Severity - Circle Factor

Very High				Normal				Low	
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	

Consider pressures, load, temperature, speed, contaminants in oil and duty cycle.

Machine Age - Circle Factor

Infant					Middle Age					Old Age	
0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.1	

Infant machines are those going through break-in and have operated for less than 1% of expected machine life. Old age machines are those showing symptoms of distress.

Oil Age - Circle Factor

Infant					Middle Age					Old Age	
0.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.25	0.1		

Infant oils are those that have just been changed and are less than 10% into expected life. Old age oils are showing trends that suggest additive depletion, the onset of oxidation or high levels of contamination.

Target Tightness - Circle Factor

Tight				Normal				Loose	
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	

Oil properties that trend extremely close to targets and limits are 'tight'. Oils that typically trend well within targets and limits are loose. For instance, an oil with a cleanliness target of 13/11 and trends around 13/11 is tight.

Place Lowest Circled Factor Here

Adjustment Factor

3. Sample Frequency = Default x Adjustment Factor

Sample Frequency

Hrs

Copyright Noria Corp.

Fuente: Noria Corporation (s. f.).

2.15 Toma de muestra

La toma de muestra es un paso sumamente importante en el análisis de aceite, debido a que de una correcta ejecución se obtiene una muestra significativa. Entre los pasos principales para obtener una muestra significativa se encuentran:

- Tener definidos los puertos de muestra principales y secundarios.
- Tomar en cuenta la presión a la que se encuentra el punto de muestreo, ya sea atmosférica, media presión (<100 psi) y alta presión (>100 psi).
- Llevar a cabo una purga en función del puerto y la manguera que se utiliza para la toma de muestra.
- Utilizar una botella de muestra de acuerdo con el objetivo del nivel de limpieza del lubricante.
- Llevar a cabo la toma de muestra en operación y enviar la muestra antes de pasadas 24 h.

2.15.1 Presión del sistema

Alta presión: Presiones superiores a 100 psi y se debe llevar a cabo la muestra utilizando dispositivos reductores de presión.

Media presión: Presiones en el puerto por debajo de los 100 psi y se puede llevar a cabo la toma de muestra con una sonda.

Baja presión: Sistemas a presión atmosférica, es donde no hay recirculación de lubricante y se debe utilizar una bomba de vacío.

2.15.2 Purga para muestreo

Para obtener una muestra representativa se debe purgar el puerto de muestreo, donde se debe tomar en cuenta el tamaño de tubería, la manguera que se utiliza y sus longitudes. Esto: “Para obtener una muestra eficaz y rica en datos, los volúmenes de lavado previos

a la muestra adecuados deben incluirse en los procedimientos de muestreo y deben ser específicos para cada puerto de muestra individual” (Noria Corporation, 2011, s. p.). Para lo cual en el presente proyecto se utiliza la siguiente ecuación, en función del puerto de muestreo:

$$\text{Volumen purga (ml)} = (At * Lt + Am * Lm) * 10 * 16.387$$

$$At \& Am = \frac{\pi * Di^2}{4}$$

At= Área de la tubería (pulg2)

Lt= Longitud de la tubería (pulgadas)

Am= Área manguera (pulg2)

Lm= Longitud de manguera (pulgadas)

X10= Factor de seguridad: “La regla general de la industria es purgar de seis a diez veces el volumen total” (Noria Corporation, 2011, s. p.).

16.387= Factor de conversión de 1pulg3 a ml

Di= Diámetro interno (pulgadas)

2.15.3 Limpieza de las botellas de muestreo

Para que características externas al lubricante no afecten la muestra de aceite existen botellas con clasificación de limpieza según la norma ISO-3722.

Figura 15. Definición del nivel de limpieza en botellas de muestreo

Niveles de limpieza	Numero de Particulas mayores a 10um
Clean	100 particulas
Super Clean	10 particulas
Ultra Clean	1 particula

Fuente: Noria Corporation (2003).

Un criterio base por tomar en cuenta es el siguiente: “Por lo general, una botella con clasificación limpia puede utilizarse cuando el rango de 6 micrones es mayor a 15 (por

ejemplo, 17/15/13 o 18/16/14) de acuerdo con ISO 4406:17” (Noria Corporation, 2020, s. p.). También es importante mencionar que el costo de las botellas superlimpias y ultralimpias es bastante significativo, por lo que se debe tener un buen criterio para su selección. Lo anterior se debe a que esto puede implicar un aumento del gasto, sin ver mucho beneficio.

2.15.4 Etiquetas de puertos de muestreo

Es necesaria una correcta identificación del puerto de muestreo para facilitar la tarea y evitar la contaminación cruzada en la muestra. Para esto, se implementa el Sistema de Identificación del Puerto de Muestreo (SPIS) desarrollado por la compañía Noria Corporation, el cual utiliza una placa de 3” x 1”, además de una combinación de colores, formas, letras y números.

Este sistema de etiquetado se desarrolla por solicitud de la compañía, donde el color identifica la presión del fluido, ya sea baja, media o alta, que se mencionó. La forma geométrica define el nivel de limpieza de la botella por utilizar y, por último, se marca el valor específico de purga, que irá determinado por el cálculo mencionado previamente.

2.16 Almacenamiento del lubricante

Este es otro factor sumamente importante que se mencionaba al inicio del presente documento, el cual era la confianza a ese *aceite nuevo*. Sin embargo, Pickle (2012), experto de Noria, asegura que un deficiente manejo del aceite nuevo, desde su adquisición, puede ser perjudicial:

El almacenamiento de lubricantes es uno de los factores más importantes en un programa de lubricación y que a menudo no es tomado en cuenta. La mayoría de las plantas reciben aceite nuevo y automáticamente asumen que está limpio. Que lo pueden poner en uso, pero lo mantienen en un ambiente sucio, lo almacenan a la intemperie o lo dejan abierto y expuesto a los contaminantes antes de usarlo (s. p.).

Por eso, se mencionan las formas correctas en que se debe almacenar el lubricante, las ventajas de un almacenamiento adecuado y algunas buenas prácticas. Un lubricante confiable debe estar:

Limpio

- Adecuado almacenamiento y manipulación
- Control de la entrada de aire

Seco

- Adecuado almacenamiento
- Buenas prácticas de limpieza

Frío

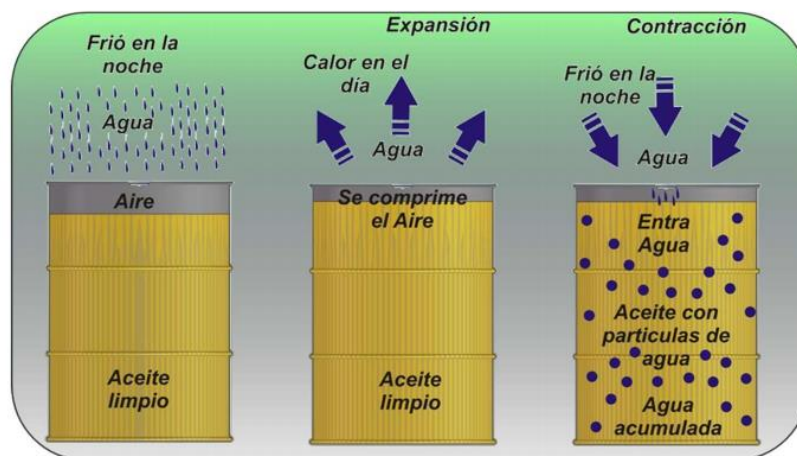
- Correcta selección de lubricante
- Óptimas condiciones de operación
- Cambio regular del aceite

Para mantener un lubricante limpio y seco se debe contar con un buen almacenamiento y con una buena manipulación. Algunas prácticas erróneas que se presentan son:

-Almacenamiento a la intemperie

Esta práctica permite el ingreso de agua al lubricante, además de otras partículas contaminantes. “El almacenamiento a la intemperie puede resultar en contaminación con agua y recalentamiento del aceite, lo cual puede degradar al lubricante antes de su aplicación a la maquinaria” (Pickle, 2012, s. p.).

Figura 16. Consecuencias de tambores mal almacenados



Fuente: Salazar (2017).

-Manipulación con envases inadecuados

Esta práctica puede ocasionar contaminación cruzada, además del ingreso de partículas del ambiente al lubricante y, posteriormente, a la máquina.

Figura 17. Envase desechable para lubricación



Fuente: Salazar (2017).

Estos envases deben ser de un solo uso y lo ideal es utilizar envases de alta calidad y de acuerdo con la tarea de lubricación.

Figura 18. Envase de alta calidad para lubricación



Fuente: Salazar (2017).

2.16.1 Almacenamiento por tambores

El almacenamiento en tambores comúnmente tiene malas prácticas. “El almacenamiento correcto en tambores puede lograrse fácilmente con un pequeño esfuerzo [...] 66% de los suscriptores [sic] de Lube-tips indican que es el método más usado” (Pickle, 2012, s. p.).

Debe evitarse el almacenamiento a la intemperie, como se mencionó, ya que este puede resultar en contaminación por agua, recalentamiento del aceite y degradación del lubricante antes de su utilización en servicio. “Los tambores nuevos deben ser almacenados bajo techo y en posición horizontal, con las tapas en las posiciones de las 3 y 9 de acuerdo con las manecillas del reloj” (Pickle, 2012, s. p.).

Figura 19. Correcto almacenamiento de tambores

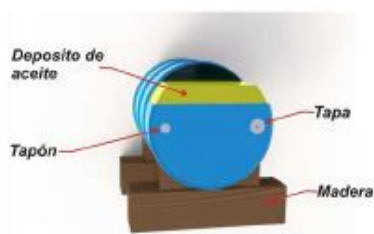


Fuente: Salazar (2017).

Para su almacenamiento correcto se pueden implementar las siguientes formas:

Figura 20. Formas de almacenamiento para tambores

Si el aceite no se va a utilizar de manera inmediata, se puede almacenar en posición horizontal.



Se pueden utilizar anaqueles para maximizar el espacio disponible.



Si el aceite se está utilizando de forma regular, sistemas de soporte y aditamentos como válvulas y filtros son recomendados.



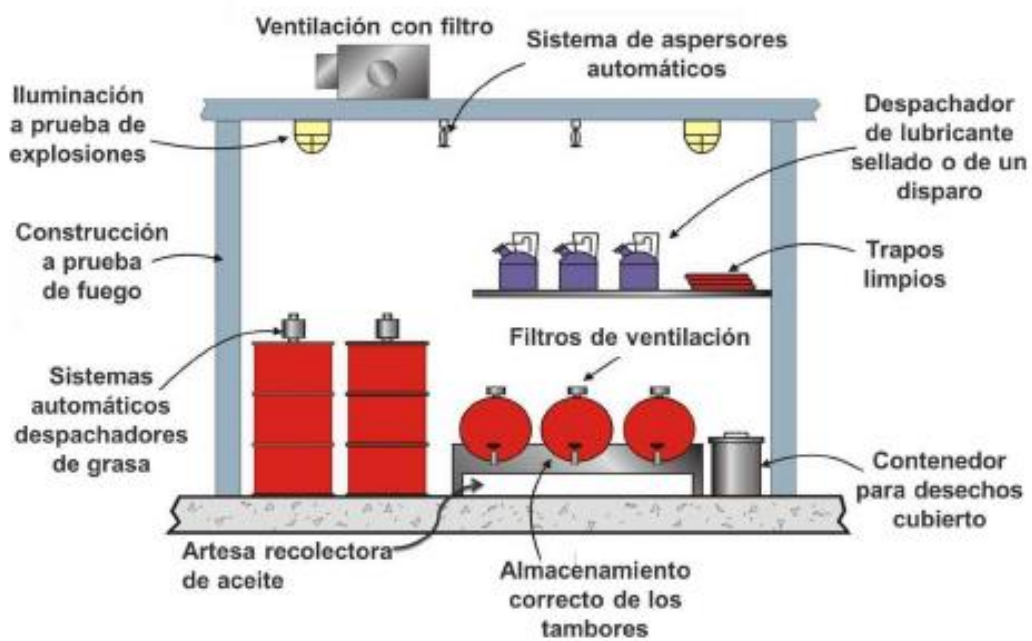
Fuente: Salazar (2017).

2.16.2 Mejores prácticas para el área de almacenamiento

Para garantizar las óptimas condiciones del aceite, se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. El suelo en el área de almacenamiento debe estar nivelado y ser resistente al aceite.
2. Instale anaqueles que protejan adecuadamente todos los recipientes y deposite los tambores sobre sus lados.
3. El área de almacenamiento debería estar bien ventilada.
4. El sitio de almacenamiento no debería estar expuesto a contaminación externa, como polvo, exceso de humedad o agua.
5. Asegúrese de que el lugar donde se almacena el aceite no esté conectado a ningún drenado, alcantarilla ni fuente de agua.
6. Utilice un sistema de contención apropiado para protección adicional.
7. Designe áreas separadas dentro de la instalación para las existencias nuevas y en uso, para facilitar la gestión de lubricantes y usar primero el primer producto que entra.
8. Asegúrese de que las etiquetas de los productos estén visibles para evitar una aplicación incorrecta.
9. Coloque carteles con la prohibición de fumar a la vista y otros que adviertan que las superficies son resbaladizas para proteger al personal de la planta.
10. Mantenga los equipos de distribución en un sitio de fácil acceso para facilitar la lubricación.
11. Habilite un acceso cómodo a los carritos de lubricación y a los camiones de elevación de horquilla.
12. El lugar de almacenamiento deberá estar cerrado con candado por motivos de seguridad (Mobil, s. f., s. p.).

Figura 21. Características de un adecuado cuarto de almacenamiento

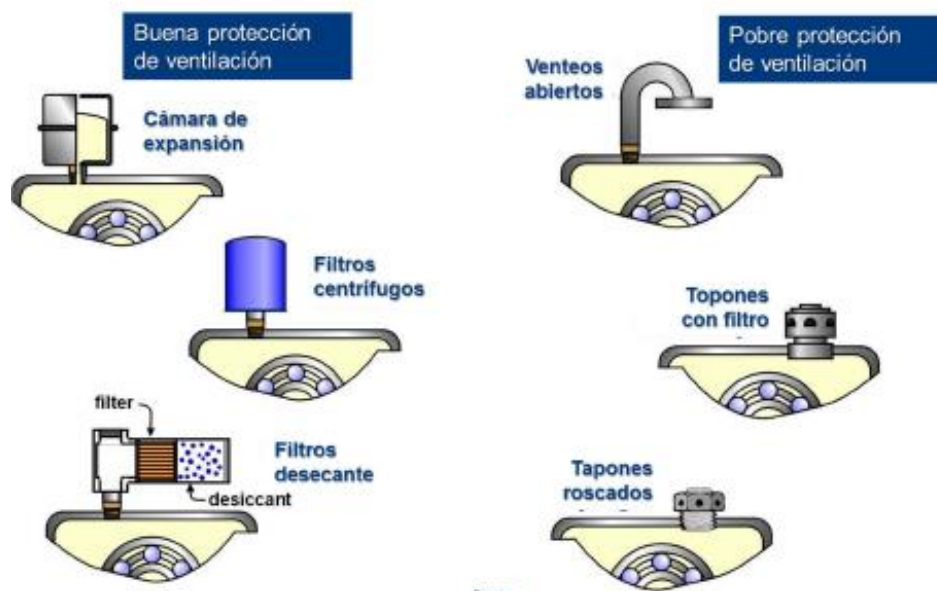


Fuente: Salazar (2017).

2.17 Control de los respiraderos

Otra buena práctica es el control de aire en los depósitos del aceite lubricante dentro del sistema de lubricación. Una simple implementación de un equipo de respiración de calidad traerá importantes beneficios.

Figura 22. Mecanismos del control de aire en tanques de depósito



Fuente: Salazar (2017).

Estos equipos permiten la expansión y contracción del aceite en las cubas a través del ingreso de aire. No obstante, este ingreso debe controlarse para evitar la contaminación y la humedad.

2.18 Metalurgia

Para el análisis de los datos se debe tener identificados los elementos y las probables fuentes de origen de las partículas de desgaste en un sistema de lubricación.

2.18.1 Metalurgia de cojinetes

Los cojinetes que se utilizan son antifricción: “La estructura del cojinete está construida en acero, fundición o bronce, y la parte donde existe fricción por deslizamiento se recubre con el metal antifricción más apropiado para cada aplicación” (Comas, 2011, s. p.). Esta composición depende de cada fabricante, entre los que se pueden encontrar:

ZOLLERN: “Acero de bajo contenido de carbono C10 revestido con metal blanco con alto contenido de estaño” (Lachnicht, 2021, s. p.) (ver Anexo 2).

RENK: “Acero fundido y metal blanco con anillos de aleación cobre y zinc” (Dudink, 2021, s. p.). El metal blanco es una aleación con base en estaño o plomo que se utilizan comúnmente en rodamientos, contienen antimonio y cobre (ver Anexo 3).

Figura 23. Resumen de los cojinetes antifricción y su material base

Designación TECNOFRIC	Base	APLICACIONES
101	Sn	Esfuerzo, choque elevado, cargas normales
102	Sn	Cojinetes de turbina, compresores centrífugos
103	Sn	Cargas elevadas, turbinas, bombas, laminadores
111	Sn	Carga superior a la 101, choque normal
109	Sn	Cojinetes de turbinas, compresores alternativos
107	Pb	Propiedades de deslizamiento y carga normales
108	Pb	Sellos compresores centrífugos, generadores, papeleras
113	Pb	Cojinetes cabeza de biela para compresores alternativos
115	Pb	Cojinetes compresores alternativos

Esta tabla resume de forma esquemática los usos más habituales de los cojinetes antifricción, según el material aplicado.

Fuente: Comas (2011).

En general: “Las aleaciones de acero fundido contienen un máximo de 0.6 % de silicio, 1 % de manganeso y 0.5% de carbono. Los aceros de alta y baja aleación también pueden incluir cromo, níquel, molibdeno o vanadio según sea requerido” (Comas, 2011, s. p.)

2.18.2 Metalurgia de las bombas

Según los especialistas de HBS Metalúrgica (s. f.):

En construcción estándar se utilizan los siguientes materiales: cuerpos y tapas de hierro fundido, material colado según norma DIN, ASTM o SAE. Su mecanizado incluye superficies de cierre lateral rectificadas o pulidas, garantizándose así hermeticidad absoluta aún sometidas a altas presiones. Ejes de acero al cromo-níquel 4140 nitrurados y rectificados. Engranajes de acero al cromo-níquel 4140 fresados en forma helicoidal, doble helicoidal o rectos según la necesidad y rectificados (s. p.).

2.18.3 Metalurgia del intercambiador de calor

Se cuenta con dos tipos de intercambiadores, los de tubos de cobres y los de acero inoxidable.

2.18.4 Metalurgia de tuberías

Se pueden utilizar tubos de acero inoxidable, la cual: “Es una aleación de hierro con 10% o más de cromo y otros elementos, que lo hacen resistente a la corrosión” (Acero Mundo, s. f., s. p.). También se pueden utilizar tubos de acero galvanizado: “Acero que ha sido galvanizado en sus superficies recubiertas con una capa de zinc, proporcionando una cantidad sustancial de protección contra la corrosión” (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018, s. p.).

2.19 Software predicción

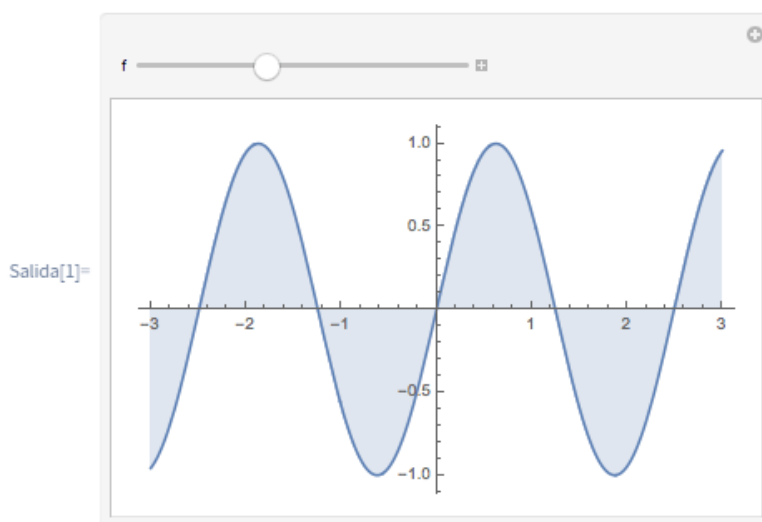
Un modelo o *software* de predicción es una herramienta que utiliza varios métodos de aproximación, ya sea lineal, polinómica, gaussiana, estadística, redes neuronales y otros para estimar un resultado. Para el presente proyecto se toma como base la programación de Wolfram Language, la cual: “Wolfram Language proporciona acceso a la potencia de la computación a un nivel considerablemente más alto que nunca, aprovechando la inteligencia computacional incorporada basada en una amplia variedad de algoritmos y conocimiento del mundo real” (Wolfram, s. f., s. p.).

Lo anterior se debe a que permite incorporar modelos matemáticos y cálculos mediante llamado de comandos simples, según su propia programación: “Preprocesamientos, recopilación de datos, visualizaciones dinámicas, análisis numérico y estadístico” (Wolfram, s. f., s. p.). Como se observa en la Figura 24 permite generar modelos interactivos, excelentes para una fácil interpretación y exposición de los resultados.

Figura 24. Ejemplo de gráfico interactivo en Wolfram

El comando `Manipular` le permite explorar de forma interactiva lo que sucede cuando varía los parámetros en tiempo real:

`En[1]:= Manipulate[Plot[Sin[f x], {x, -3, 3}, Filling -> Axis], {f, 1, 5}]`



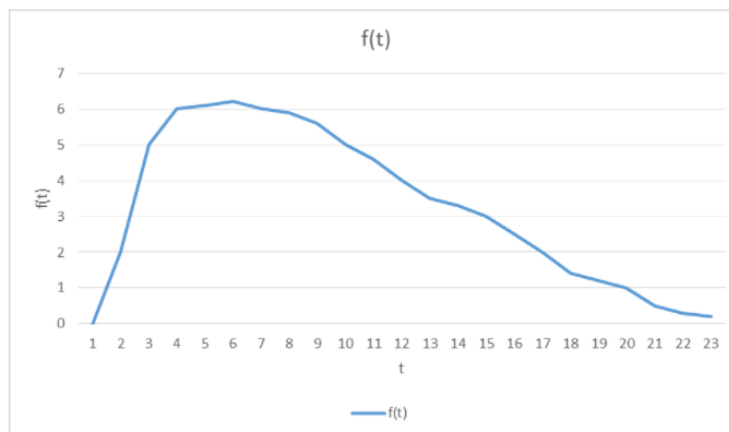
Fuente: Wolfram (s. f.).

2.19.1 Modelos probabilísticos

Para respaldar los resultados es necesario contar con datos que permitan predecir un comportamiento. El análisis de datos es el principal paso para determinar las funciones probabilísticas en el análisis de confiabilidad de los equipos. Según Ferrera Martínez (s. f.): “Las funciones que sirven para estudiar los datos de duración, las más utilizadas son funciones como la Función de Densidad, y la Función de Distribución” (s. f.).

Ferrera Martínez (s. f.) concuerda que las fallas ocurren de forma aleatoria y en tiempos no determinados, por lo tanto, en la Figura 25 explica: “T es una variable aleatoria no negativa y continua que representa el tiempo transcurrido entre el inicio de operación hasta la falla. Vamos a denominar $f(t)$ a la Función de Densidad de Probabilidad de la variable T (PDF)” (s. p.).

Figura 25. Función de Densidad de Probabilidad de la variable T



- La PDF es la forma usual de representar una distribución de falla.

Fuente: Martínez (s. f.).

Esta curva PDF viene dada, usualmente, por las fallas de los equipos en intervalos de vida; a partir de ella se pueden derivar las otras funciones que se relacionan con la confiabilidad (ver Anexo 4 para más detalle). Es este análisis matemático el que permite determinar un aproximado de la mejora en la disponibilidad del conjunto turbogenerador en las centrales hidroeléctricas, con la implementación de un adecuado programa de lubricación.

3 Cap. III. Marco metodológico

3.1 Hipótesis

La implementación de un programa de lubricación que se basa en el análisis de aceite logra reducir el impacto de las fallas ligadas a los sistemas hidráulicos, lo que reduce el impacto en la disponibilidad del conjunto turbogenerador hasta en un 30 %.

3.2 Tipo de investigación

El presente proyecto tiene un enfoque cuantitativo en el que en el marco teórico se justifica el planteamiento y la necesidad del programa de lubricación en el mantenimiento que se basa en la confiabilidad. Además, se analizan datos asociados con el análisis de aceite, lo que genera líneas base para las propiedades idóneas del aceite, tiempos de muestreo y, por consiguiente, definición de acciones preventivas junto con los demás programas del RCM. El beneficio de este programa se determina a partir del cálculo de confiabilidad del sistema turbogenerador.

3.3 Área de estudio del proyecto

A continuación, se detallan las áreas de estudio del proyecto.

3.3.1 Línea temática

Evaluación de reducción de tiempos de fallas mediante el mantenimiento RCM con la aplicación de un programa de lubricación en centrales hidroeléctricas.

3.3.2 Situación problemática

Inexistencia de un programa de lubricación dentro del mantenimiento con base en confiabilidad.

3.3.3 Área temática

Mantenimiento RCM y sus tecnologías de condición.

3.3.4 Tema de estudio

Implementación del programa de lubricación con enfoque Sacode al mantenimiento RCM de las plantas hidroeléctricas de Coopelesca R. L.

3.3.5 Objeto de estudio

Efecto de implementar un programa de lubricación, que se basa en el análisis de aceite sobre la disponibilidad (impacto de la falla y tiempo de reparación de la falla) del conjunto turbogenerador de las centrales hidroeléctricas de Coopelesca R. L.

3.4 Definición de las variables de estudio

En la Tabla 2 se presentan los indicadores de las variables de estudio.

Tabla 2. Indicadores de las variables de estudio.

Objetivo	Nombre del indicador	Definición teórica	Variables experimentales, herramientas
General	1.a Disponibilidad	1.a Es el cálculo del tiempo en horas de trabajo, horas de falla y cantidad de fallas	1.a Órdenes de trabajo, histórico de fallas y horas de producción del sistema Scada $Disponibilidad = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$
Específico 1	1.a Disponibilidad 1.b Mantenibilidad 1.c Confiabilidad	1.a Es el cálculo del tiempo en horas de trabajo, horas de falla y cantidad de fallas 1.b Es la probabilidad de fallo del sistema 1.c Es la probabilidad de que el sistema funcione.	1.a : $Disponibilidad = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$ 1.b: $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ 1.c: $R(t) = e^{-\lambda t}$
Específico 2	3.a Cantidad de aditivos 3.b Propiedades lubricante 3.c Limpieza del lubricante 3.d Contaminantes	3.a Partes por millón de los aditivos base del lubricante 3.b Viscosidad @ 40°C y @ 100°C 3.c Cantidad y tamaño de partículas en micras dentro del lubricante 3.d Partículas externar dentro del lubricante a causa de desgaste en equipos	3.a Partes por millón (ppm) de boro, calcio, magnesio, fósforo y zinc. 3.b Viscosidad del lubricante que se utiliza. 3.c Partículas >4um, >6um y >14um. 3.d Contaminación por desgaste de los cojinetes, bombas e intercambiadores de calor.
Específico 3	2.a Evaluación de acciones de control 2.b Correlación de acciones	2.a Análisis causa raíz del sistema 2.b Corroboración de la falla con mínimo 2 tecnologías de monitoreo	2.a Diagramas de Ishikawa y análisis de criticidad. 2.b Fortalezas y debilidades de cada tecnología, plan de acción de detección de fallas.
Específico 4	4.a Costos 4.b Cotizaciones 4.c Presupuestos	4.a Costos operativos de un proyecto 4.b Costos estipulado por fabricantes 4.c Dinero disponible para proyectos	4.a Salarios, mano de obra, equipos y costos operacionales 4.b Solicitudes de cotizaciones a los distintos proveedores de lubricante y los análisis de aceites 4.c Monto estipulado por la Gerencia para la implementación y ejecución de nuevos proyectos.

Fuente: Elaboración propia (2021).

3.5 Muestra

Para el presente proyecto se toman como muestra los sistemas de lubricación y regulación del conjunto turbogenerador de las cinco plantas hidroeléctricas de Coopelesca R. L., ya que son las bases de la implementación del programa de lubricación y donde se toman las muestras para el análisis de aceite. Esto da a conocer los aspectos de salud, contaminación y desgaste del lubricante, equipos auxiliares, cojinetes y regulación del conjunto turbogenerador.

Para la predicción del modelo matemático se toman las condiciones de la central hidroeléctrica de La Esperanza, la cual cuenta con la mayoría de los datos para conocer disponibilidades, tiempo entre fallas y paradas de las fallas. Además, cuenta con la mayoría de las fichas técnicas de los equipos.

3.6 Diseño metodológico

Pasos para desarrollar el proyecto y sus herramientas:

1. La recolección de datos e información para el estudio y definición de los indicadores de confiabilidad se realiza de forma directa, con los operadores y las personas en puestos de jefatura de las distintas centrales hidroeléctricas, almacenándose en tablas de Microsoft Excel para su análisis posterior. De igual manera, se le solicitará a la Gerencia de producción de energía los históricos de fallas almacenados y las hojas de vida de los sistemas turbogeneradores del último trimestre del año 2020 y los dos primeros trimestres del año 2021 (ver Apéndice A).
2. Para la selección de los equipos principales son las unidades de lubricación que presentan mayor criticidad, definido en el marco teórico.

3. Entre la identificación de los modos de falla se utiliza el cálculo AMFE, definido en el marco teórico.
4. Se realiza el planteamiento del programa de lubricación utilizando el método Sacode, según la biblioteca de Machinery Lubrication. Esto se debe a que tiene implícito los demás métodos de proactividad y análisis estadísticos, además de presentar mayor sencillez para la evaluación de los análisis de aceite al seccionar cada prueba en las tres categorías de salud, contaminación y desgaste.
5. La selección de pruebas de rutina y excepción corresponden con análisis de criticidad y análisis AMFE, evaluación de las pruebas vs. los modos de falla, recomendaciones teóricas y de expertos.
6. Los límites y la línea base que deben respetar los análisis de aceites están determinados por características de las hojas técnicas de los lubricantes, normas internacionales, guías de implementación y el análisis de una muestra de lubricante totalmente nuevo.
7. Entre la determinación de la frecuencia se lleva a cabo un estudio más elaborado en el cual se toman en cuenta factores como la severidad del ambiente, factores de edad del equipo, factores de edad del fluido, criticidad del equipo y los resultados del monitoreo de condición.
8. La selección del laboratorio está definida por el presupuesto y el convenio que tiene la Gerencia con Lubricantes Petro Canadá. Sin embargo, ellos están anuentes a las necesidades que presente el proyecto en relación con las pruebas de rutina y excepción.
9. Los siguientes pasos del proceso de análisis del lubricante los realiza el ingeniero a cargo, donde él define el almacenamiento de información, el

monitoreo de la condición y la asignación del técnico, junto con la toma de decisiones. Sin embargo, las acciones de control están ligadas un poco a esto último, ya que son acciones a partir de ciertos parámetros con bases que puedan arrojar el análisis de aceite, donde involucren la sinergia de las demás tecnologías del RCM, utilizando herramientas de material teórico como fortalezas de las tecnologías y recomendaciones de expertos.

10. Para los detalles de costo-beneficio asociados con el programa de lubricación se ejecuta un análisis de escenarios presentando un escenario optimista, intermedio y pesimista de acuerdo con cotizaciones, costos de lubricante, salarios y otros costos operativos.
11. Para finalizar con el cálculo del beneficio de este programa de lubricación integral al RCM y reducción del impacto por falla en la disponibilidad del sistema turbogenerador, se realiza el desarrollo de una herramienta programada para la estimación y proyección de este impacto, definiendo puntualmente las variables y puntos de mejora que se utilizan. En esta estimación se puede obtener el beneficio de la implementación del presente proyecto en las centrales hidroeléctricas. Se sustituye la evaluación real debido al factor tiempo de desarrollo del proyecto.

4 Cap. IV. Resultados y desarrollo

4.1 Estudio del estado actual de disponibilidad

Para el estudio del estado actual en los sistemas turbogeneradores y determinar el impacto del análisis de aceite (AA) se deben considerar los datos de tiempos de producción, tiempos de mantenimiento, cantidad de averías y el tiempo de parada de esta avería. Estos datos se adquieren de archivos de Microsoft Excel suministrados por la Gerencia, en los cuales se maneja un formato automático que debe rellenar el operador de planta, diariamente, con todas las variables mencionadas.

De estos archivos se recopiló la disponibilidad y la indisponibilidad, los cuales se pueden observar a modo de resumen en la Tabla 3. La recopilación de los datos abarca un periodo de 12 meses, a partir de septiembre del año 2020 y hasta septiembre del año 2021 (agosto 2021 no se toma en cuenta, debido a que no se tienen los datos, por cambios en el formato de registro) esto en las dos unidades de la central de La Esperanza y la central de Aguas Zarcas (ver Apéndice A, para el total de datos).

La disponibilidad está determinada por las horas de producción y de reserva entre las horas totales del mes. Por otro lado, la indisponibilidad es la suma de los paros, averías o tiempos no programados, entre el total de horas del mes.

Tabla 3. Datos resumen de confiabilidad CH La Esperanza y CH Aguas Zarcas

Datos resumen				
CH La Esperanza				
Valor	Unidad 1		Unidad 2	
	Disponibilidad	Indisponibilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad
Promedio	97.872	2.128	91.062	8.938
Mínimo	95.24	0.56	14.33	0.05
Máximo	99.44	4.76	99.95	85.67
CH Aguas Zarcas				

Valor	Unidad 1		Unidad 2	
	Disponibilidad	Indisponibilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad
Promedio	83.133	16.839	91.508	8.526
Mínimo	14.57	0.04	19.21	0.24
Máximo	99.96	85.43	99.76	80.79

Se puede apreciar que estos sistemas manejan una alta disponibilidad, se observa en 3 de 4 unidades un promedio mayor al 91 % en 12 meses para este indicador, lo cual da bastante seguridad a la Cooperativa. Sin embargo, también 3 de 4 equipos presentaron valores mínimos de 14.33 %, 14.57 % y 19.2 % de disponibilidad en uno de los meses de trabajo y es en este punto en el que se le da el enfoque al presente proyecto.

En las unidades de Aguas Zarcas esta caída de la disponibilidad está ligada directamente a la gestión realizada durante un mantenimiento mayor en abril del año 2021, el cual se basa en el desarme total del conjunto turbogenerador. Sin embargo, este es un tiempo programado que no afecta al indicador, lo que afecta son las situaciones que se salen de esa programación. Los factores que afectan al indicador son atrasos en los contratistas, problemas de montajes, falta de equipo o materiales para las acciones del mantenimiento y algunos otros no ligados a lubricación.

4.2 Estudio de falla crítica

Por otra parte, hay una situación en el registro que liga indirectamente al sistema hidráulico y representa una caída de más del 50 % en la disponibilidad. En esta falla existió una fricción severa entre las pistas del cojinete y las pistas del eje y tiene esto alta probabilidad de haber sido detectado con anticipación por el análisis de aceite. De igual manera, una falla de esta magnitud puede presentarse y relacionarse directamente a la pobre salud del lubricante o a una contaminación externa del lubricante.

Según lo expuesto en el estudio de causa raíz de la falla (ver informe técnico en Anexo 5), realizado por ingenieros del Área de Gestión Técnica de Coopelesca, el acople entre

el eje de turbina y eje de generador presentó una falla por desgaste. Esto ocasionó inmediatamente el desbalanceo del eje del generador chocando y friccionando con el cojinete de empuje, estos son dos los que recibieron el mayor daño. La conclusión de por qué falló el acople es que al parecer el conjunto estaba presentando un desalineamiento leve, que junto con el deterioro por tiempo de uso del acople y la falta de inspección llevaron a esa situación.

La reparación del eje la efectuó el ICE y tuvo un costo superior a los 4 000 000 de colones, con un tiempo de duración de 15 días. Solo este arreglo representa más del 50 % de la disponibilidad de este mes, además del impacto económico debido al paro de producción.

Por otra parte, se llevó a cabo la sustitución del cojinete por uno en *stock*, por lo que esto no supuso mayor costo productivo que el del eje, aunque se realizó la consulta a los expertos del taller Riggioni para una reparación de este tipo en caso de no contar con el repuesto (situación de otras centrales). Ante la consulta definieron algunas variables como que según tamaño y el tipo de daño absorbido por el cojinete, los costos varían y la duración del trabajo oscila entre 8 a 22 días (ver Tabla 4).

El daño recibido por el cojinete en esta falla fue crítico, por lo que el arreglo supuso un costo entre los 4 y los 6 000 000 debido a sus dimensiones. Este valor es estimado debido a que no se cuenta con el registro correspondiente de ese momento.

Tabla 4. Cotización del taller Riggioni para falla de cojinetes

Referencias de reparación de cojinetes**			
Modelo de cojinete	Diámetro (mm)	Escenario leve	Escenario crítico
RENK EFWLK 22-225	225	1 a 3 000 000	4 a 6 000 000
RENK EGXLA 28-280	280	2 a 4 000 000	6 a 9 000 000
GTW WGZLA 45-400	400	3 a 6 000 000	9 a 12 000 000

entiéndase escenario leve y escenario crítico por lo siguiente:

ESCENARIO LEVE	ESCENARIO CRÍTICO
Ingeniería inversa parcial	Ingeniería inversa

Aporte localizado	Reemplazo completo de babbitt
Maquinado	Colado centrífugo
Inspecciones NDT	Maquinado
	Inspecciones NDT

***Solo cojinetes radiales o de empuje (No incluye almohadillas)*

Fuente: Bolaños (2021).

Además de los costos directos mencionados, se tuvo que llevar a cabo el estudio de la causa raíz, lo que implicó tiempo de trabajo para los ingenieros y técnicos, desarme total del conjunto turbogenerador y todas las pruebas y mediciones para descartar otros fallos. Asimismo, después de la reparación fue necesario equipo de trabajo para el montaje y contratación de servicios para alineamiento láser en máquinas rotativas, el cual representa un costo aproximado de ₡70.100 por cada verificación.

Aunque la conclusión tomada fue el acople, se determinó también la posibilidad de existir partículas de polvo, tierra e incluso desgaste en el sistema de lubricación que agravó el desgaste por fricción. Además, como se menciona en la teoría, una mala lubricación y control de contaminantes puede llevar a este mismo fallo e incluso afectar los otros tres cojinetes y no solo el de empuje del generador. En la Figura 26 se evidencia el daño del eje.

Figura 26. Daño recibido por la cara de la guía del eje



Fuente: Coopesca R. L. (s. f.).

La implementación de un programa de lubricación que se basa en el análisis de aceite que se propone en los siguientes apartados pudo haber determinado presencia de desgaste y alta concentración de partículas. Esto lleva, junto con el aumento de las variables en el análisis de vibraciones, a determinar la existencia de un posible modo de falla relacionado con el desalineamiento o desbalanceo, lo que disminuye el impacto final de la falla.

4.2.1 Estudio de fallas ligadas a las centrales hidráulicas

De los archivos de Microsoft Excel se recopilan otras fallas ligadas a las centrales hidráulicas, para analizar los posibles tiempos de afectación en la disponibilidad (ver Anexo 6). En el archivo se determina automáticamente la duración en horas de los eventos, cuando el operador digita la hora de la falla y, después, la hora de inicio de operación para cada evento, es necesario indicar si es falla propia, programada o externa, además de definir el sistema, componente y explicar lo sucedido.

En la Tabla 5 se resumen las fallas ligadas a los sistemas hidráulicos en un periodo de un año, donde se detalla la cantidad de fallas totales ligadas a un componente, la suma de estas horas de falla y el tiempo medio de reparación de esta falla (MTTR). Además de la falla específica detallada previamente.

Tabla 5. Datos resumen de las fallas en los sistemas turbogeneradores

Tabla resumen					
Sistema	Componente	Falla	Cantidad de fallas	Horas Totales	MTTR (hrs)
Generador	Cojinete	Temperatura	18	28.72	1.596
	Unidad Lubricación	Temperatura aceite	4	1.45	0.363
		Presión	3	0.8	0.267
		Nivel aceite	2	1.34	0.670
		Fuga	1	1.58	1.580
		Bombas AC y DC	13	12.81	0.985
		Bomba mecánica	5	42.48	8.496
		Suciedad en la cuba	4	1.7	0.425
Turbina	Unidad Regulación	Bombas AC y DC	5	6.3	1.26
		Presión	3	2.05	0.683
		Pistón	1	3.25	3.25

		Suciedad en la cuba	2	0.4	0.2
Intercambiador	Tubos	Obstrucción del agua	2	0.42	0.21
	Filtración	Filtro obstruido	12	7	0.583
Caso específico					
Turbogenerador	Eje y cojinete	Fricción severa	1	360	360
	Cojinete	Babbitt	3	403.2	134.4

De lo anterior se puede evidenciar que las fallas más significativas están ligadas, según su valor de MTTR, a la bomba mecánica de lubricación, el pistón del sistema de regulación y los cojinetes del generador. Aunque no se conoce el impacto físico de cada falla en los componentes, la bomba mecánica se relaciona con falla de los engranes, por lo que es necesario efectuar un desmontaje o desarme completo y de ahí su alto valor de 8.49 h de MTTR.

La falla en el pistón representa la misma complejidad, donde se debe efectuar un desarme parcial para revisar el estado del vástago y presencia de fugas. Por otra parte, la alta temperatura en los cojinetes puede estar ligado al deterioro del lubricante, a la fricción en las paredes del cojinete (desgaste), falla en el intercambiador de calor y algunas otras menos significativas.

Además, la falla de fricción severa expuesta, donde 360 h de MTTR representan los 15 días de paro. También el remplazo de Babbitt debido a desgaste con un valor de MTTR de 192 h aproximadamente una semana.

Se evidencia la necesidad de un programa de lubricación para que la Cooperativa cuente con un programa de mantenimiento centrado en confiabilidad completo, debido a que este programa y el análisis de aceite permitirán disminuir las pérdidas, descubrir efectos de deterioro o desgaste, mantener el equipo limpio y la máquina en buenas condiciones. Esta situación se hace imposible y se refleja en los históricos de fallas, los gastos de mantenimiento y las pérdidas económicas de producción.

Asimismo, las centrales han venido trabajando con el formato de cambios de aceite según horas de trabajo del sistema de generación. La falta de un análisis de aceite impide que se conozca el estado del aceite en el punto de cambio, lo que impide conocer si este todavía puede trabajar más horas o, en caso contrario, el aceite se encontraba muy deteriorado, por lo que podría generar problemas al equipo.

4.3 Propuesta de un programa de lubricación

Es cierto que el conjunto turbogenerador presenta alta disponibilidad, sin embargo, con la tecnología del análisis de aceite junto con vibraciones y termografías, se evalúan muchas más condiciones de falla. Esto evita fallas catastróficas, como la presentada y disminuye otros imprevistos que se relacionan con las unidades hidráulicas. Por lo tanto, en este apartado se determinan todas las pautas para implementar un programa de lubricación robusto y con un enfoque proactivo.

4.3.1 Análisis de criticidad

Inicialmente, es indispensable enfocarse en los equipos más críticos para llevar a cabo los análisis de aceite, ya que son los que representan mayor valor. Para esto, se toman en cuenta los factores de mayor importancia para la Cooperativa (ver el Apéndice B para los datos recopilados de las centrales y sus equipos).

Se definen los valores de la matriz de criticidad, observadas en la Tabla 6 en función de los objetivos, necesidades e importancia de la empresa, además del alcance económico con la que esta cuenta para el área de mantenimiento. Por lo tanto, se define junto con el ingeniero Esteban Cedeño, quien tiene 8 años de experiencia en las centrales hidroeléctricas, conoce el proceso de producción y la visión de la Gerencia, al contar con una maestría en administración de proyectos y formar parte del área de gestión técnica.

Los factores tomados en cuenta son seguridad y ambiente, impacto productivo, costo de reparación y el tiempo promedio de reparación. Cada factor tiene una clasificación de gravedad de 1 a 5, siendo 1 la más leve y 5 la más crítica.

Además, junto con el ingeniero se definen los criterios de probabilidad de la falla anual, en un rango de 1 a 5, siendo el valor de 1 excelente y el valor de 5 crítico, observados en la Tabla 7. Con estos parámetros se evalúa la criticidad de lo que puede

representar una falla en distintos sistemas del conjunto turbogenerador, esto para enfocar el análisis de aceite hacia esos equipos.

Tabla 6. Matriz de criticidad

Gravedad	CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD				
	Clasificación	Seguridad y Ambiente	Impacto Productivo	Costo Reparación	Tiempo Promedio de Reparación	1	2	3	4	5
						<1%	1%-5%	5%-25%	25%-50%	>50%
						Remota	Improbable	Poco probable	Probable	Muy Probable
5	Desastrosa	Atenta contra la vida interna y externa de la planta	Parada inmediata de toda la generación	Mayor a \$50,000	Mayor a 1 mes	5	10	15	20	25
4	Catastrófica	Afecta el ambiente y las instalaciones, daños severos	Parada de un sector de generación	De \$20,000 a \$50,000	De 15 días a 30 días	4	8	12	16	20
3	Grave	Afecta el ambiente y las instalaciones, daños menores	Impacto del nivel de producción y calidad normal	De \$10,000 a \$20,000	De 3-7 días	3	6	9	12	15
2	Seria	Impacto ambiental fuera de las normas y ningún daño humano	Repercute algunos costos operacionales adicionales	De \$5,000 a \$10,000	De 1-3 días	2	4	6	8	10
1	Moderada	No provoca daños al personal ni al ambiente	Sin efectos significativos sobre producción	Menor a \$5,000	Menor a 1/2 día (12hrs)	1	2	3	4	5

Tabla 7. Valores de probabilidad

Probabilidad	
1	Excelente 0-1 falla/año
2	Buena 2 fallas/año
3	Media 3-4 fallas/año
4	Grave 5 fallas/año
5	Crítico mayor 5 fallas/año

A partir de aquí se logra identificar en la Tabla 8 que los equipos más críticos son el generador y el conjunto distribuidor, seguidos por el intercambiador de calor, los cojinetes de empuje, la bomba mecánica y los cojinetes guía. Esto se debe a que se encuentran en un valor de impacto de riesgo anual por encima de 14 puntos (ver el Gráfico 1 para una percepción más ilustrativa y resumida del estudio crítico).

En la Tabla 6 se representa el valor asignado para cada parámetro de la matriz de criticidad de los equipos en estudio. Debido a la fórmula para determinar la criticidad el factor de probabilidad es uno de los que más influye al estar en multiplicación con el resultado de la suma de los demás factores.

Por esto, aunque los cojinetes de empuje representen el mismo valor de 14 puntos para las consecuencias que el generador, no llegan a ser igual de significativos debido a que su probabilidad de falla es baja. Otro equipo como el intercambiador de calor tiene una probabilidad de falla de 2, lo que hace que su valor de consecuencia de 9 puntos se duplique y tenga al final un impacto anual mucho mayor, incluso más que los cojinetes.

El generador representa el equipo más crítico, aunque mucho se debe a fallas eléctricas que no se encuentran en el alcance del presente proyecto, al igual que las funciones mecánicas de la turbina. Por esta razón, el distribuidor (que corresponde al sistema de regulación), el intercambiador, los cojinetes y la bomba mecánica son los más críticos; estos tres últimos pertenecientes al sistema de lubricación.

Para el conjunto distribuidor el análisis de vibraciones y la termografía son tecnologías que no pueden evaluar su condición de manera óptima, ya que la mayoría de la carga está en el pistón que utiliza aceite para la transmisión de trabajo. El intercambiador de calor sí puede evaluarse con la termografía de manera externa, observando si cumple o no con su función de enfriar el lubricante, pero no evaluar el estado interno ante fugas u oxidaciones en las tuberías.

Los cojinetes pueden evaluarse muy bien por el análisis de vibraciones y un poco por la termografía para determinar cuando está en curso una falla por desalineamiento o fricción. Sin embargo, el análisis de aceite puede determinar de una manera más temprana estos estados y asegurar la correcta lubricación de un aceite limpio. Por último, en la bomba mecánica puede evaluarse una falla mediante el análisis de vibraciones, pero, de

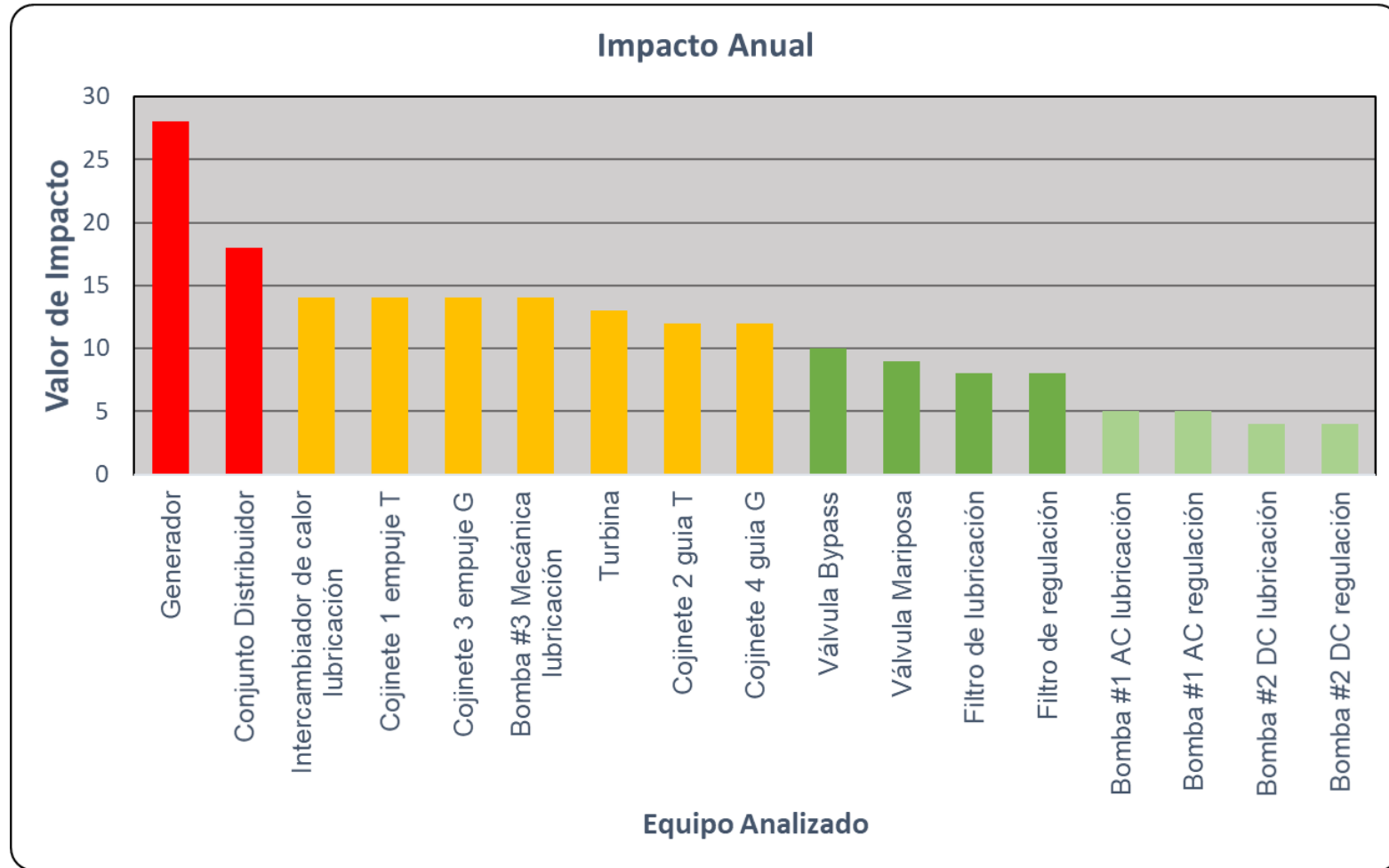
igual manera, el análisis de aceite evidencia este estado más temprano en el tiempo y es posible evaluar otras fallas ligadas a desgastes.

Las tecnologías de vibraciones y termografías son muy útiles para otros modos de falla, por ejemplo, en cavitaciones de la turbina o problemas con los alabes, también en evaluación de los estados de las mufas de alta potencia y otros puntos de conexión eléctricas. Sin embargo, se hace evidente que no son capaces de evaluar de la mejor forma equipos como el intercambiador de calor y los cojinetes, lo que demuestra deficiencias de la evaluación del estado condición de los equipos, principal objetivo del mantenimiento centrado en confiabilidad que se desea implementar.

Tabla 8. Análisis crítico de los equipos del sistema turbogenerador

Análisis AMFE							
Análisis	F	S	IP	CR	TR	C	Riesgo Final
Equipo	Frecuencia anual	Seguridad	Impacto productivo	Costo reparación	Tiempo reparación	Consecuencias S+IP+CR+TR	F*C
Generador	2	2	4	4	4	14	28
Conjunto distribuidor	2	1	3	2	3	9	18
Intercambiador de calor lubricación	2	2	2	1	2	7	14
Cojinete 1 empuje T	1	4	4	3	3	14	14
Cojinete 3 empuje G	1	4	4	3	3	14	14
Bomba #3 Mecánica lubricación	2	2	2	1	2	7	14
Turbina	1	1	4	4	4	13	13
Cojinete 2 guía T	1	3	4	2	3	12	12
Cojinete 4 guía G	1	3	4	2	3	12	12
Válvula <i>bypass</i>	2	1	2	1	1	5	10
Válvula mariposa	1	1	3	3	2	9	9
Filtro de lubricación	2	1	1	1	1	4	8
Filtro de regulación	2	1	1	1	1	4	8
Bomba #1 AC lubricación	1	1	2	1	1	5	5
Bomba #1 AC regulación	1	1	2	1	1	5	5
Bomba #2 DC lubricación	1	1	1	1	1	4	4
Bomba #2 DC regulación	1	1	1	1	1	4	4

Gráfico 1. Riesgo final anual de los equipos del sistema turbogenerador



4.3.2 Determinación de los modos de falla

Una vez determinados los equipos críticos, el siguiente paso es evaluar sus modos de falla y clasificarlos en función del riesgo para, de esta forma, enfocar el AA. Para la determinación de los modos de falla se trabajó, de igual manera, con el ingeniero Cedeño y se solicitó colaboración de algunos técnicos de las centrales hidroeléctricas, para su evaluación desde la experiencia. Además, se tomaron referencias de trabajos como el de Cabrera Ramón *et al.* (2021) y se verificaron con algunos modos de falla definidos previamente por el Departamento de Área de Gestión Técnica. En las siguientes tablas se definen los modos de fallas que se relacionan con los equipos de mayor criticidad:

Tabla 9. Modos de falla del conjunto distribuidor

No:	Componente Parte/ equipo	Falla		Modo de falla	
1	Pistón	A	Falta de potencia	1	Fugas internas
				2	Fugas externas
				3	Suministro de aceite inadecuado
				4	Lubricante deteriorado
		B	Desgaste de las piezas	1	Desalineamiento
				2	Contaminación del aceite
				3	Altas temperaturas de trabajo
		C	Ruidos al movimiento	1	Desgaste de las guías
				2	Falta de lubricación
				3	Pandeo del vástago
2	Filtro	A	Partículas abrasivas en el aceite	1	Colmatación
		B	Diferencial de presión	1	Filtro sucio u obstruido

				2	Fugas en el filtro
--	--	--	--	---	--------------------

Tabla 10. Modos de falla del intercambiador de calor

No:	Componente Parte/ equipo	Falla		Modo de falla	
3	Intercambiador	A	Aceite con alta temperatura	1	Suciedad del intercambiador
				2	Excesiva sedimentación
		B	Agua en el aceite	1	Fugas en tubos o placas

Tabla 11. Modos de falla de los cojinetes

No:	Componente Parte/ equipo	Falla		Modo de falla	
4	Cojinete empuje	A	Alta temperatura de trabajo	1	Caudal del lubricante insuficiente
				2	Fricción del eje y cojinete
				3	Lubricante oxidado
				4	Alta temperatura de aceite
		B	Pérdida de aceite lubricante	1	Perdida de estanqueidad
				2	Fugas en la tubería de lubricación
				3	Agujeros en la cuba de lubricación
		C	El cojinete no brinda estabilidad al eje	1	Exceso de vibraciones
				2	Fractura de la base o pernos del cojinete
				3	Desalineamientos/desbalance del eje
		D	Desgaste de las paredes del cojinete	1	Contaminación del aceite por desgaste
				2	Contaminación del aceite por externos
				3	Degradación del aceite
				4	Problemas en el filtro de aceite
5	Cojinete guía	A	Alta temperatura de trabajo	1	Caudal del lubricante insuficiente

				2	Fricción del eje y cojinete
				3	Lubricante oxidado
				4	Alta temperatura de aceite
		B	Pérdida de aceite lubricante	1	Pérdida de estanqueidad
				2	Fugas en la tubería de lubricación
				3	Agujeros en la cuba de lubricación
		C	El cojinete no brinda estabilidad al eje	1	Exceso de vibraciones
				2	Fractura de la base o pernos del cojinete
				3	Desalineamientos/desbalance del eje
		D	Desgaste de las paredes del cojinete	1	Contaminación del aceite por desgaste
				2	Contaminación del aceite por externos
				3	Degradación del aceite
				4	Problemas en el filtro de aceite

Tabla 12. Modos de falla de la bomba mecánica

No:	Componente Parte/ equipo	Falla	Modo de falla
6	Bomba mecánica	A	Disminución de la presión del sistema
			1 Engranajes dañados
			2 Fugas en la tubería de lubricación
			3 Alta formación de espuma
			4 Obstrucción en la cámara
			5 Alta temperatura del aceite
		B	Aumento de la presión del sistema
			1 Tuberías de distribución obstruidas
			2 Filtro obstruido
			3 Sensor de presión dañado
			4 Baja temperatura de aceite

4.3.3 Análisis de modos de falla AMFE

Después de determinar los modos de falla que se relacionan con los sistemas hidráulicos y la teoría del capítulo anterior en el apartado 2.12 Análisis de modos falla AMFE, se clasifican las fallas de mayor a menor, en función del valor del índice de probabilidad de riesgo (IPR), como se muestra en la Tabla 13. Los más críticos son la contaminación por desgaste, lubricante deteriorado, contaminación del aceite, fugas del intercambiador (agua en el aceite), desalineamiento/desbalance y degradación del aceite.

En la Tabla 13 de izquierda a derecha se aprecia en la primera columna el modo de falla referente de las tablas anteriores, posteriormente el valor de gravedad, de frecuencia y de detección explicados en la teoría. Su valor y su determinación están definidos a partir de valores de 1 hasta 10, siendo 1 el valor más leve y 10 el valor más crítico para las tres categorías.

El valor del IPR se determina de la multiplicación de las tres variables y su clasificación está definida en la Tabla 1. Los modos de fallo con valores mayores a 200 son inaceptables y se deben efectuar tareas de mantenimiento para evaluarlas, en este caso lo ideal es detectar estas fallas a tiempo a través de las pruebas del análisis de aceite del apartado 2.9 Pruebas del análisis. Por lo tanto, es necesario hacer la selección de estas pruebas de manera adecuada, para proteger a los equipos de fallas catastróficas e incluso desastrosas, que pueden impactar directamente la producción mensual de electricidad.

Tabla 13. Valores IPR del análisis modos de falla

Modo de falla	Gravedad	Frecuencia	Detección	IPR
Contaminación del aceite por desgaste	9	4	7	252
Lubricante deteriorado	4	7	8	224
Contaminación del aceite por externos	8	4	7	224
Fugas del intercambiador	6	4	9	216
Desalineamientos/desbalance del eje	10	2	10	200
Degradación del aceite	8	5	5	200
Exceso de vibraciones	5	5	7	175
Fricción eje y cojinete	5	6	5	150
Alta temperatura del aceite	4	4	5	80
Suciedad del intercambiador	2	5	6	60
Filtro colmatado	2	7	4	56
Tuberías de distribución obstruidas	4	2	4	32
Alta formación de espuma	3	2	5	30
Fugas en el filtro	2	5	3	30
Excesiva sedimentación	2	2	7	28
Caudal del lubricante insuficiente	2	2	6	24
Obstrucción en la cámara de bomba	2	2	6	24
Fractura de la base o pernos del cojinete	5	2	2	20
Engranajes dañados	1	2	8	16
Sensor de presión dañado	1	2	8	16
Fugas en la tubería de lubricación	2	2	2	8
Baja temperatura de aceite	1	1	5	5
Pérdida de estanqueidad	2	1	2	4
Agujeros en la cuba de lubricación	1	1	2	2

4.3.4 Selección de pruebas para el análisis de aceite

Una vez obtenido el análisis de criticidad y la evaluación de los modos de falla AMFE, se conocen los modos de falla más críticos, en los cuales se centrará el análisis de aceite para controlarlos o mitigarlos.

Para la selección de las pruebas se procede con la Tabla 14 y se toma como referencia el documento de *Interpretación de Análisis de lubricante* por Trujillo (2013). La tabla relaciona toda la teoría de las pruebas del análisis de aceite con los modos de falla críticos y determinados. Esto mediante la simbología de flechas, lo que indica cuando crece, decrece o hay poca incidencia en el resultado de cada prueba (ver Tabla 15).

La tabla se interpreta de la siguiente manera, en la primera columna con título *Modo de falla* se enlistan los modos determinados previamente y se seccionan según la categoría de salud, contaminación y desgaste al que responden. Después, viene una sucesión de columnas donde como título tiene cada una de las pruebas del análisis de aceite.

Por ejemplo, ubicándose en el modo de falla de degradación (oxidación) y haciendo el barrido de forma horizontal, implicará primero un aumento en la viscosidad, un aumento en el valor de número ácido (AN) y un aumento de oxidación por FTIR. Además, implicará una disminución en los valores de los aditivos, RULER y RPVOT, esto cuando este modo de falla comience a presentarse.

De esta misma forma, se obtienen los comportamientos de todas las pruebas del análisis de aceite ante los demás modos de falla. Con esto se logran definir las pruebas de mayor implicación y las que brinden mucha más información según la cantidad de modos de falla a las que responden.

Tabla 14. Evaluación de las pruebas del análisis de aceite frente a los modos de falla

Modo de falla		Viscosidad	Índice de viscosidad	AN	Oxidación FTIR	Nitración (FTIR)	Antioxidante FTIR	Antidesgaste FTIR	Zinc (Zn)	Fósforo (P)	RULER (oxidación)	RPVOT	Potencial de Barniz	Agua	Conteo de partículas	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Silicio (Si)	Aluminio (Al)	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	PQ índice	DRF
Salud																										
	Viscosidad incorrecta	↕													↑					↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
	lubricante deteriorado	↕		↓	↕		↓	↓	↓	↓	↓	↓			↑					↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
	Degradación (Oxidación)	↑		↑	↑		↓	↓	↓	↓	↓	↓		↕	↕					↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
	Degradación térmica	↑				↑	↓				↓	↓	↑		↑					↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
Contaminación																										
	Contaminación por externos														↑			↑	↑	↑	↑	↑			↑	↑
	Contaminación con agua	↑		↑	↑								↑	↑	↑					↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
	Falla del filtro														↑			↕	↕	↑	↑	↑	↕	↕	↑	↑
	Falla del intercambiador	↑		↑	↑								↑	↑	↑	↑		↑	↑	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕

		Viscosidad	Índice de viscosidad	AN	Oxidación FTIR	Nitración (FTIR)	Antioxidante FTIR	Antidesgaste FTIR	Zinc (Zn)	Fósforo (P)	RULER (oxidación)	RPVOT	Potencial de Barniz	Agua	Conteo de partículas	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Silicio (Si)	Aluminio (Al)	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	PQ index	DRF
Desgaste																										
	Desgaste de cojinete														↑					↑	↑	↑	↕	↕	↑	↑
	Desgaste bomba														↑					↑	↑	↑	↕	↕	↑	↑
	Desalineamiento/desbalance														↑					↑	↑	↑	↕	↕	↑	↑
	Vibraciones														↑					↑	↑	↑	↕	↕	↑	↑

Tabla 15. Simbología de la evaluación de las pruebas de análisis de aceite

Simbología	
Símbolo	Detalle
↕	Los datos pueden crecer o decrecer
↑	Los datos crecen
↓	Los datos decrecen
↕	Los datos crecen o decrecen en proporción y no siempre

De lo anterior se definen las pruebas de rutina en la Tabla 16 y las pruebas de excepción en la Tabla 17, además de la asignación del código de las normas ASTM (recordando que este código se relaciona con la estandarización de los procedimientos para cada prueba). Por otra parte, como se menciona en el apartado 2.13 Dimensiones del análisis de aceite, las pruebas de rutina usualmente son de bajo costo y ayudan a evaluar el estado condición de los activos y las pruebas de excepción son, por lo general, más costosas y ayudan a delimitar la causa raíz de una forma más específica.

Por lo tanto, las pruebas definidas en la Tabla 16 son las pruebas mínimas por implementar para mantener bajo control los modos de fallas evaluados, de igual manera, se define la categoría a la que esta prueba responde, lo que demuestra que la categoría de *salud* es la que más variables tiene. Por otra parte, cuando alguna de estas pruebas presente valores fuera de rango es indicativo de que algo sucede, si esta situación puede definirse con certeza se procede con las acciones de control. En caso de tener duda o existir ambigüedad es cuando se utilizan las pruebas de excepción de la Tabla 17.

Por ende, el análisis de viscosidad, el conteo de partículas y análisis de aditivos abarcan, de forma general, la salud del aceite en las unidades hidráulicas; el número ácido y la espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier ayudan a delimitar un poco algunos modos de falla. Por último, la concentración de agua se relaciona con identificar fugas en el intercambiador o entrada anormal de agua.

Tabla 16. Pruebas de rutina del análisis de aceite

Pruebas rutina	Categoría que evalúa	Código
Viscosidad @ 100°C	SALUD	ASTM D7279
Viscosidad @ 40°C	SALUD	ASTM D7279
Índice de viscosidad	SALUD	ASTM D2270
Número ácido (AN)	SALUD	ASTM D974
Oxidación por FTIR	SALUD	ASTM D7414
Nitración por FTIR	SALUD	ASTM D7624
Aditivos por método atómico (AES)	SALUD	ASTM D5185
Concentración de agua	SALUD	ASTM D6304
Conteo de partículas sólidas	CONTAMINACIÓN	ASTM D7647
Partículas >4um		ISO 4406
Partículas >6um		ISO 4406
Partículas >14um		ISO 4406
Contaminantes por método atómico (AES)	CONTAMINACIÓN	ASTM D5185
Concentración de metales de desgaste (AES)	DESGASTE	ASTM D5185

Tabla 17. Pruebas de excepción del análisis de aceite

Pruebas excepción	Categoría que evalúa	Código
Demulsibilidad mecánica	SALUD	ASTM D1401
Aditivos por el método molecular	SALUD	ASTM D7412
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	SALUD	ASTM D6971
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	SALUD	ASTM D2272
Potencial para generar barniz (MPC)	SALUD	ASTM D7843
Concentración de partículas ferromagnéticas (DRF)	DESGASTE	ASTM D8120
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	DESGASTE	ASTM D8184
Identificación de características de partículas por método ferrografía analítica	DESGASTE	ASTM D7690

4.3.5 Definición de los límites

Para evaluar el momento y la situación cuando se presenten valores fuera de rango y actuar en consecuencia, es necesario determinar esos rangos para cada una de las pruebas que se seleccionaron. Para establecer los límites se toma como guía inicial recomendaciones de fabricantes, información de Machinery Lubrication y la norma ASTM-D 4378-97 en la que se define que los valores de viscosidad no admiten variaciones superiores al $\pm 5\%$ respecto al aceite nuevo (ver Anexo 7, límites base).

Se toma como referencia los aceites de la central de La Esperanza para establecer los límites iniciales (ver Apéndice C para estos datos de aceites de cada central). En la Tabla 18 se pueden apreciar 4 columnas en los cuales está identificada la prueba, la línea base de cada prueba, el valor o límite preventivo y el valor o límite crítico.

Para los valores de línea base se toman los datos de las hojas del fabricante del aceite, en este caso Turboflo RyO 46 y Hydrex AW 68. Lo recomendado es llevar a cabo una prueba de laboratorio de un aceite nuevo como se establece en algunos apartados de la tabla.

Por otra parte, se puede apreciar en esta tabla que para la viscosidad existen límites inferiores y superiores para valores preventivos y críticos ya establecidos. En este caso el valor preventivo representa un $\pm 5\%$ del aceite nuevo y el valor crítico un $\pm 10\%$ del aceite nuevo. Para el número ácido se establecen rangos superiores, por ejemplo, de $+0.03$ KOH/g preventivo para lubricación, $+0.2$ KOH/g preventivo para hidráulico y $+0.05$ KOH/g crítico para lubricación y $+1.0$ KOH/g crítico para hidráulico, esto con respecto al aceite nuevo. Otro por detallar es la concentración de agua, se establecen recomendaciones de contenido máximo admisible en turbinas de 200 ppm como valor preventivo y 500 ppm como valor crítico.

La prueba de mayor dificultad para establecer límites es el conteo de partículas sólidas, esto porque la línea base se calcula en función del equipo, su presión y ciclo de trabajo, su vida útil, su criticidad y el entorno de operación. Por lo tanto, el aceite de lubricación Turboflo presenta un valor objetivo de 16/14/11 (ver Tabla E1) diferente valor de línea base con respecto al valor del aceite hidráulico Hydrex con un valor objetivo de 17/15/12 (ver Tabla E2). Sin embargo, en ambos casos se establece para valor preventivo +1 código ISO 4406 y para valor crítico +2 códigos ISO 4406 con referencia a este valor de línea base (ver cálculo en el Apéndice D).

Tabla 18. Límites preventivos y críticos para los aceites de la central La Esperanza

Prueba	Línea base	Valor preventivo	Valor crítico
Turboflo RyO46			
Viscosidad @ 100°C	6.70 cSt	Min:6.37 Max:7.04	Min:6.03 Max:7.37
Viscosidad @ 40°C	44.4 cSt	Min:42.2 Max:46.6	Min:39.9 Max:48.8
Índice de viscosidad	104	-	-
Número ácido (AN)	0.12 mg KOH/g	0.15	0.17
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Aditivos por método atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	16/14/11 (Lub)	18/15/12	19/16/13
Contaminantes por método atómico (AES)	0	-	-
Demulsibilidad mecánica	41-39-0 (15 min)	41-39-0 (35 min)	41-39-0 (55 min)
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída —10 %	Caída —25 %
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +5.000 h	4.000 h (—20 %)	1.000 h (—80 %)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Análisis nuevo	-45 % del tiempo	-75 % del tiempo
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estándar	+2 Desv Estándar
Concentración de partículas ferromagnéticas (DRF)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs. AES (Fe)	Evaluar condición vs. AES (Fe)
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		
Hydrex AW 68			

Viscosidad @ 100°C	8.90 cSt	Min:8.45 Max:9.34	Min:8.01 Max:9.79
Viscosidad @ 40°C	67.4 cSt	Min:64.0 Max:70.8	Min:60.7 Max:74.1
Índice de viscosidad	106	-	-
Número ácido (AN)	0.6 mg KOH/g	0.8	1.6
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Aditivos por método atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	17/15/12 (Reg)	18/16/13	19/17/14
Contaminantes por método atómico (AES)	0	-	-
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (10 min)	40-40-0 (30 min)	40-40-0 (50 min)
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +6.500 h	5.200 h (-20 %)	1.300 h (-80 %)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Análisis nuevo	-45 % del tiempo	-75 % del tiempo
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estándar	+2 Desv Estándar
Concentración de partículas ferromagnéticas (DRF)	—	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs. AES (Fe)	Evaluar condición vs. AES (Fe)
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		

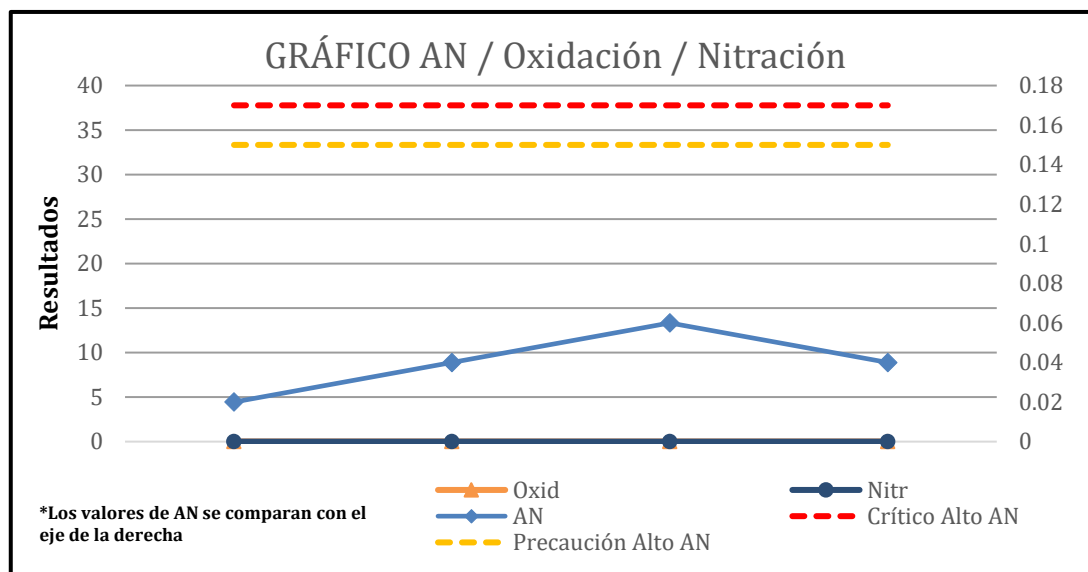
4.3.5.1 Representación gráfica de los límites

Una vez definidos los límites es conveniente representarlos de manera gráfica para un estudio y análisis de resultados más sencillo, ordenado y estadístico. Por esta razón, se desarrolla una pequeña herramienta en Microsoft Excel que se enfoca en cada tipo de aceite que se utiliza en las distintas centrales hidroeléctricas.

En el Gráfico 2 se observa a modo de ejemplo la tendencia del número ácido con el límite preventivo a 0.15 KOH/g y el límite crítico a 0.17 KOH/g, ya establecidos del aceite Turboflo de la tabla anterior. Esta herramienta permite evaluar la tendencia y la tasa de cambio para las pruebas del análisis de aceite, ya que de nada sirve obtener datos

o resultados si estos no se analizan y no se les brinda la importancia adecuada (ver Apéndice E para las demás características del Microsoft Excel).

Gráfico 2. Resultados del número ácido para los análisis del año 2021, CH La Esperanza



4.3.6 Definición de la frecuencia

Otro de los factores indispensables que se deben definir para obtener grandes beneficios del análisis de aceites es el establecimiento de frecuencias de muestreo adecuadas. Para esto, se procede con la determinación de la frecuencia, según lo que se mencionó en el apartado 2.14 Frecuencia de muestreo. El cálculo se aplica una única vez para todas las tomas de muestras de todas las centrales, recordando que esta frecuencia se puede modificar para responder a situaciones específicas (ver Apéndice F). En la Tabla 19 se muestran las frecuencias determinadas a partir del cálculo y las condiciones en que se utiliza o en las que se debe modificar el tiempo de frecuencia.

La frecuencia base estipulada, en un estado óptimo, bueno y sin fallas donde el equipo y el aceite muestran una estabilidad en sus condiciones, es de tres meses, por lo tanto, cada tres meses se llevan a cabo las pruebas de rutina definidas previamente. La frecuencia mensual es una frecuencia ajustada que responde a un estado anormal, este es

cuando algún resultado del AA presenta valores de precaución y cuando el equipo o el aceite llegan al fin de su vida útil, esto porque la probabilidad de ocurrencia de una falla es significativa.

Por último, la otra frecuencia ajustada se estipula cada 10 días cuando se presentan resultados con valores críticos en el AA, en situaciones de cambios totales de aceite y en puestas en marcha de los equipos (mantenimientos mayores). Esto porque la probabilidad de falla es bastante elevada, debido a que existió manipulación y está presente el error humano. Un descuido o mal montaje pueden causar graves problemas y es necesario tener mejor control del estado de los equipos en estas situaciones.

Además, se estipulan otras frecuencias a modo de recomendación, en condiciones de estado normal, como mensual y anual, donde la frecuencia mensual responde a un planeamiento a mediano plazo de implementación de equipo para análisis en sitio junto con un técnico calificado, esto para llevar a cabo pruebas básicas de viscosidad y AN con más frecuencia. La frecuencia anual se plantea para establecer una periodicidad a ciertas pruebas de excepción como RULER o RPVOT que recomienda la norma ASTM-D 4378-97.

Tabla 19. Frecuencias estipuladas para el análisis de aceite

Tiempo	Condición	Detalles
Trimestral	Estado normal	Frecuencia normal de muestreo para todas las pruebas estipuladas de rutina de laboratorio
Mensual	Estado anormal	Frecuencia ajustada para casos de resultados de precaución del análisis de aceite, reducción de la vida útil del equipo o el aceite.
Cada 10 días	Estado crítico	Frecuencia ajustada en casos de resultados críticos del análisis de aceite, cambios de aceite o puesta en marcha de equipos.
Otras recomendaciones		
Mensual	Estado normal	Frecuencia normal de muestreo para pruebas específicas en sitio
Anual	Estado normal	Frecuencia normal para algunas pruebas de excepción de laboratorio

4.4 Correcta toma de muestra y otros factores

Con el establecimiento de las pruebas de rutina y excepción en función de la criticidad y análisis de modos de fallo, el establecimiento de los límites para cada prueba y la frecuencia definida se tiene aproximadamente el 40 % del programa de lubricación. Este 40 % bien establecido asegura las bases del análisis de aceite.

Sin embargo, para que este logre representar verdaderamente el estado condición del aceite es necesario cumplir con otros aspectos más allá del AA, los cuales incluyen, llevar a cabo una correcta toma de muestra para que sea representativa, contar con un buen etiquetado para que no se confundan las muestras y los aceites y conocer las posibles fuentes de desgaste. Por último, mantener trabajando un aceite limpio, seco y fresco e incluso asegurar esto en el aceite nuevo, antes de que ingrese a las unidades hidráulicas.

Todos estos factores fuera del propio análisis de aceite se desarrollan en los siguientes apartados para que el programa de lubricación aplicado llegue a ser de clase mundial. Lo primero es definir el procedimiento correcto de la toma de muestra, esto porque el análisis que se haga al aceite debe ser de una muestra significativa, para que evidencie, de manera precisa, el estado condición del sistema. Esta muestra no debe presentar suciedad inducida por el exterior o el técnico que realiza las acciones de muestreo.

Para esto, se desarrolló un boletín informativo en la herramienta Canva, con las características más importantes que deben tomar en cuenta los técnicos para la toma de muestra, además de los pasos que deben seguir (ver Figura 27). En el boletín se definen 13 pasos para la correcta toma de muestra, además, hace hincapié en aspectos importantes por considerar, como llevar a cabo la toma de muestra en operación y no en sistemas fríos; anotar los datos en la etiqueta y asegurarse de purgar el punto de muestreo, entre otros.

Figura 27. Pasos estándar para una correcta toma de muestra

PASOS PARA UNA CORRECTA TOMA DE MUESTRA

ASEGURARSE DE CONTAR CON LA ADECUADA BOTELLA SEGÚN EL NIVEL DE LIMPIEZA Y LA ETIQUETA DE IDENTIFICACIÓN CON TODOS LOS DATOS






- 1-PREPARE UNA BOLSA DE CIERRE HERMÉTICO (ZIP-LOCK) POR CADA BOTELLA DE MUESTREO
- 2-TOME EL TRAMO DE MANGUERA IDENTIFICADO PARA EL PUERTO EN EL QUE TOMARÁ LA MUESTRA. (DEBE ESTAR DENTRO DE UNA BOLSA HERMÉTICA)
- 3-INTRODUZCA LA BOTELLA EN LA BOLSA HERMÉTICA Y SÉLLELA
- 4-PURGUE LOS ACCESORIOS CON LA CANTIDAD DE ml ESPECÍFICOS EN LA ETIQUETA DEL PUERTO
- 6-DESENROQUE LA TABA DE LA BOTELLA, SIN ABRIR LA BOLSA HERMÉTICA
- 7-INSERTE LA MANGUERA DE MUESTREO EN LA BOTELLA PERFORANDO LA BOLSA Y APIRIETE LA TUERCA DE SUJECIÓN
- 8-LLENE LA BOTELLA DE MUESTRA CON EL ACEITE LUBRICANTE
- 9-RETIRE LA MANGUERA Y SIN DERRAMAR ACEITE, NI SACARLA DE LA BOLSA, COLOQUE LA TAPA
- 10-GUARDE LA MANGUERA UTILIZADA EN LA BOLSA HERMÉTICA
- 11-MANTENGA LA MUESTRA DENTRO DE LA BOLSA HASTA ENCONTRARSE EN UN AMBIENTE LIMPIO
- 12-SÁQUELA, LÍMPIELA Y ETIQUETE LA TAPA COINCIDIENDO CON LA INFORMACIÓN EN LA ETIQUETA
- 13-ENVÍE LA MUESTRA AL LABORATORIO ANTES DE LAS 24HRS

NUNCA OLVIDE...

REALIZAR SIEMPRE UN ADECUADO PROCEDIMIENTO DE PURGA

HACER LA TOMA DE MUESTRA SIEMPRE A LA FRECUENCIA ESTIPULADA

HACER LA TOMA DE MUESTRA EN OPERACIÓN (PARA EL SISTEMA DE REGULACIÓN REALICE LA TOMA DURANTE UNA VARIANTE EN LA CONSIGNA DE POTENCIA)



¿QUÉ NO HACER?

NO REALICE TOMAS DE MUESTRA EN SISTEMAS FRÍOS

NO HACER CAMBIOS EN LOS MÉTODOS O UBICACIONES DE MUESTREO

NO UTILIZAR EQUIPO DE MUESTREO SUCIO NI REUTILIZAR EL EQUIPO



EL ÉXITO...

- EL ÉXITO DEL PROGRAMA DE LUBRICACIÓN ES DADO POR UNA ADECUADA TOMA DE MUESTRA, QUE NO CONTENGA ALTERACIONES, PARA REPRESENTAR LA CONDICIÓN REAL DE LA MÁQUINA

"UNA DE LAS TAREAS FUNDAMENTALES EN EL ANÁLISIS DE LUBRICANTE ES LA TOMA DE UNA MUESTRA REPRESENTATIVA Y CONFIABLE" (NORIA, 2020)

COOPELESCA R.L.

ASEGURE LOS SIGUIENTES DATOS EN LA ETIQUETA DE IDENTIFICACIÓN:

- FECHA DE LA TOMA DE MUESTRA
- TIPO DE ACEITE
- MÁQUINA O COMPONENTE
- HORAS DESDE LA ÚLTIMA REPARACIÓN DE LA MÁQUINA
- HORAS DEL LUBRICANTE

ANOTAR SI EXISTIÓ UN CAMBIO DE ACEITE, UN CAMBIO DE FILTRO O UN AÑADIDO DE ACEITE.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Volumen de purgado

Como se menciona en el paso 4 del boletín anterior, es necesario purgar el puerto de muestreo. Por lo tanto, se determina a partir de la fórmula expuesta en el apartado 2.14.2 Purga para muestreo, las dimensiones del puerto y la manguera que se utiliza (ver Anexo 8 para hoja de datos).

En la Tabla 20 se determinaron los valores en ml de aceite por purgar, esto para eliminar todo residuo no deseado en los dispositivos de muestreo y así evitar perturbaciones en los resultados de los análisis. Este valor está determinado por el área y la longitud del puerto, más el área y la longitud de la manguera. En resumen, es la suma del volumen del puerto y el volumen de la manguera más un x10 de factor de seguridad ya establecido por norma.

En este caso, lo ideal es que la longitud de la manguera se estandarice a 27 in para siempre purgar el mismo valor de 47.156 ml de aceite. Sin embargo, se representa el valor de purga calculado para otras longitudes como 5, 10 y 20 in en caso de necesidad (ver Apéndice G).

Tabla 20. Valor de purga en ml para la toma de muestra

Volumen sugerido de purga (ml)						
Detalles de punto de muestreo			Volumen sugerido (ml)			
Válvula y conector toma	Longitud (pulgadas)	DI (pulgadas)	Manguera de 1/16"			
			Longitud			
			5"	10"	20"	27"
Tognella FT 290-14	4"	0.22	29.04	33.15	41.39	47.17

4.4.2 Selección de la botella de muestreo

Para que partículas implícitas en el material y la calidad de la botella no interfieran en el análisis de aceite se selecciona un nivel de limpieza de las botellas en función del valor objetivo de limpieza ISO 4406 calculado previamente.

Por lo tanto, en la Tabla 21 se muestra el nivel de limpieza de botella seleccionado según lo establecido en la norma ISO 3722 en la columna de la derecha. Para ambos casos es suficiente con una botella limpia para llevar a cabo el muestreo de los aceites, sin que exista una contaminación que perturbe los resultados de los análisis (ver apartado 2.14.3 Limpieza de las botellas de muestreo para otras clasificaciones).

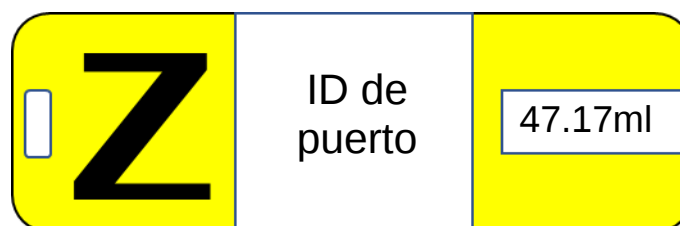
Tabla 21. Selección del nivel de limpieza de las botellas de muestreo

Valor objetivo de limpieza		Nivel de limpieza de botella
Lubricación	16/14/11	Limpia
Regulación	17/15/12	Limpia

4.4.3 Etiquetado de los puertos de muestreo

Para evitar errores de muestras de aceite mezcladas o equivocadas lo ideal es etiquetar los puertos de muestreo y las botellas, a lo cual al seguir la recomendación de la empresa se define el etiquetado de los puertos según el apartado 2.14.4 Etiquetas de puertos de muestreo. Para esto es necesaria la presión de trabajo del sistema, el volumen de purgado, definir el uso de bolsa *zip-lock* en el procedimiento o no y el tipo de nivel de limpieza de botella.

En la Figura 28 se aprecia el formato establecido donde involucra todos los parámetros mencionados, el color amarillo representa una presión media, la Z significa con bolsa *zip-lock*, el valor de purgado va implícito y el nivel de limpieza de la botella es mediante la forma geométrica donde está el ID del puerto, en este caso rectangular. La identificación de cada puerto es más sencilla y evitará posibles confusiones.

Figura 28. Ejemplo de etiquetado del puerto de muestreo de lubricación

4.4.4 Origen de las partículas de desgaste

Otro aspecto es analizar los componentes de desgaste y su posible origen dentro del sistema de lubricación y regulación de las diferentes plantas hidroeléctricas. Primero los cojinetes, segundo los cilindros, tercero las bombas, cuarto el intercambiador de calor y, por último, las tuberías.

A partir de la teoría y las hojas de datos se definen las partículas de desgaste que se pueden presentar en los análisis de aceite y sus correspondientes fuentes de origen. Entre lo destacado en la Tabla 22 se encuentra que existen contaminantes como el antimonio y el estaño que se asocian directamente con un modelo de cojinete, visto más específicamente en el apartado 2.17.1. Metalurgia de cojinetes.

Tabla 22. Contaminantes y sus orígenes entre los sistemas hidráulicos

Contaminante	Símbolo	Origen dentro del sistema
Aluminio	Al	Cilindro/Intercambiador
Antimonio	Sb	Cojinetes
Cobre	Cu	Cojinete/Intercambiador
Cromo	Cr	Bombas/Tuberías
Estaño	Sn	Cojinetes
Hierro	Fe	Bombas/Tuberías
Níquel	Ni	Cilindros/Bombas
Zinc	Zn	Cojinetes/Tubería

Es importante mencionar que se pueden presentar otras partículas de desgaste y no se está restringido únicamente a la información anterior. Por este motivo, se deben implementar las distintas pruebas de excepción en el análisis de aceite para llegar a la causa raíz.

4.4.5 Evaluación y recomendación del almacenamiento y los tipos de respiraderos

Por último, el almacenamiento y los respiraderos son los más importantes para mantener la calidad del aceite limpio, seco y fresco. Por lo tanto, se les dio un seguimiento, se tomaron evidencias y se hizo el estudio correspondiente de las variables o condiciones con las que cuentan las centrales para sus aceites.

En la Figura 29 se evidencian algunas de las características evaluadas, como protección contra el ambiente, ventilación, demarcación y delimitación, iluminación, etiquetado y almacenamiento correcto de tambores. En este apartado se toma la central de Cubujuquí como ejemplo, porque ilustra adecuadamente todos los factores.

Figura 29. Cuarto de almacenamiento de la central hidroeléctrica de Cubujuquí



El almacenamiento que maneja esta central hidroeléctrica es bastante ordenado, sin embargo, esta y todas las demás hidroeléctricas cuentan con un almacenamiento incorrecto de los tambores. Como se menciona en el Capítulo 2.16 Almacenamiento del lubricante, los tambores deben almacenarse de manera horizontal, con las tapas en la posición de las 3 y la 9 según las manecillas del reloj, si no es el caso deben como mínimo tener una cierta inclinación o tapa que evite la contaminación de este aceite nuevo con agua y partículas externas.

En la Tabla 23 se evalúan todas las características mínimas con las que deben contar los cuartos de almacenamiento, clasificados con un valor entre 1 y 3, siendo 1 deficiente, 2 regular y 3 aceptable. Como se mencionó, la central de Cubujuquí cuenta con una protección contra el ambiente, demarcación, etiquetado e iluminación aceptable; mientras que un deficiente almacenamiento de los tambores.

La tabla se interpreta posicionándose en la primera columna de las condiciones evaluadas, después desplazándose hacia la derecha se encuentra el valor obtenido por cada central para esta condición. Lo anterior según el manejo que se le da o la implementación con la que cuentan.

Tabla 23. Condiciones de los cuartos de almacenamiento y los respiradores

Condición cuarto de almacenamiento	Central Hidroeléctrica														
	Deficiente (1)					Regular (2)					Aceptable (3)				
	CH Aguas Zarcas			CH Chocosuela			CH Cubujuquí			CH La Esperanza			CH Platanar		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Protección contra el ambiente		X				X			X			X			X
Ventilación y filtro		X			X			X			X			X	
Demarcación y delimitación	X				X				X		X		X		
Iluminación		X				X			X			X			X
Etiquetas y carteles de seguridad	X				X				X	X			X		
Almacenamiento correcto de los tambores	X			X			X			X			X		
Estantes para otros químicos		X				X			X		X		X		
Mesa de trabajo	X			X			X			X			X		
Respirador de la cuba															
Sistema de Lubricación		X		X				X		X			X		
Sistema de Regulación			X		X		X			X					X

Por otra parte, como se muestra al final de la tabla se evaluaron los respiradores de la cuba. La central de Cubujuquí cuenta con una clasificación regular para el respiradero de la cuba de lubricación y una clasificación deficiente en el caso de la cuba de regulación. Esto se presenta principalmente porque la cuba de lubricación sí cuenta con un respirador

dsecante, que brinda una protección adecuada de ventilación, pero también cuenta con un tapón con filtro, entonces el aire no está obligado a pasar solo por el filtro dsecante, lo que reduce su eficiencia (ver Figura 30).

Por otro lado, en la Figura 31 se evidencia la implementación de un único respiradero tipo tapón con filtro en la cuba de regulación, brindando este una pobre protección de ventilación. Lo recomendado es sustituir todos los tapones con filtro por filtros dsecantes y en los casos donde se encuentran utilizando los dos, se debe eliminar el tapón con filtro.

Figura 30. Respiradores de cuba de lubricación en la CH Cubujuquí.

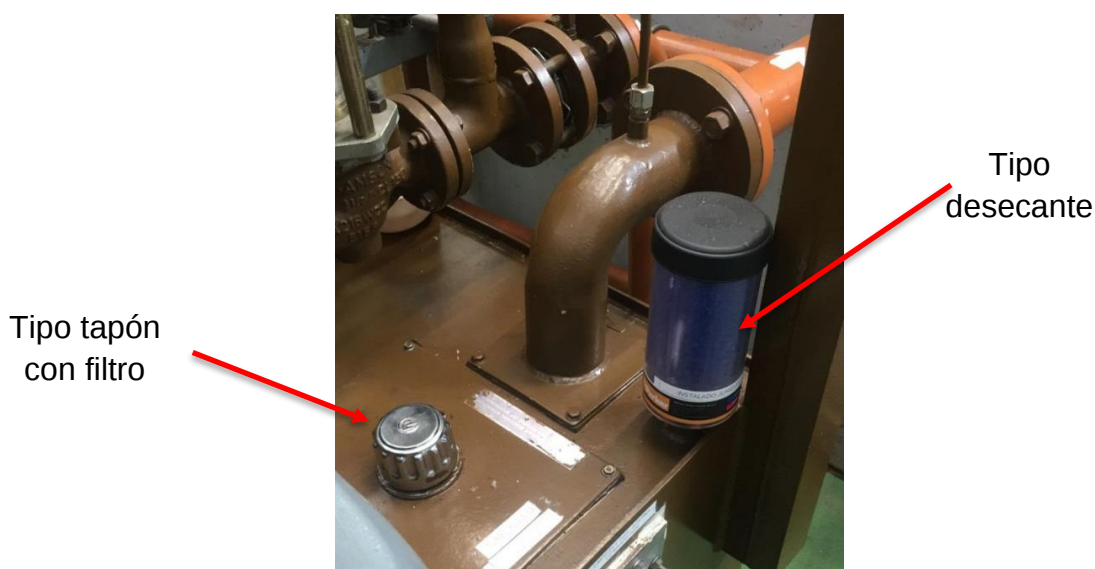
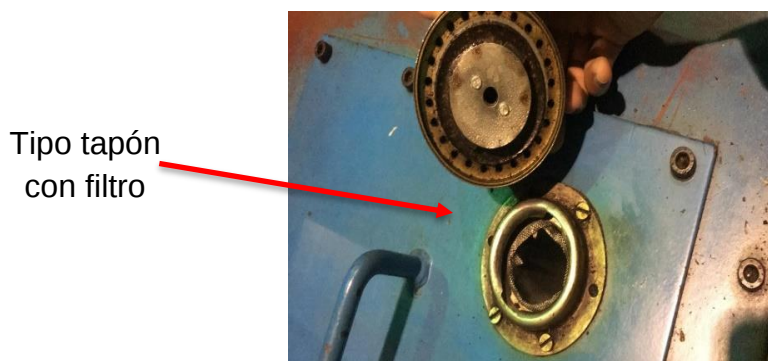


Figura 31. Respirador de cuba de regulación en la CH Cubujuquí



4.5 Evaluación y mejora de los análisis de aceite

Por otro lado, durante el desarrollo del proyecto se realizaron análisis de aceite, los cuales eran cortesía de Petro Canadá por la compra de los aceites. Gracias al apoyo del ingeniero Cedeño y la Gerencia se pudo tener acceso a ellos, lo cual permite evidenciar, de manera práctica, las acciones y recomendaciones que presenta el estudio. En el presente apartado se mencionan las observaciones más importantes.

Primero, en la Tabla 24 se puede apreciar en la primera columna los valores límite ISO estipulados por el laboratorio para el conteo de partículas sólidas, en la columna del medio los valores ISO que se obtienen del análisis de aceite realizado y en la tercera columna el valor de precaución ISO recomendado por el proyecto, esto para los sistemas de lubricación y regulación. Este código ISO indica la cantidad de partículas mayores a 4 micras, a 6 micras y a 14 micras.

El límite preventivo se estipula con +1 código ISO determinado en el apartado 4.3.5 Límites, Tabla 18. Por lo tanto, el laboratorio asume un nivel objetivo ISO de 18/16/13 en lubricación y un nivel objetivo ISO 18/16/13 en regulación, mientras que lo calculado en el proyecto es un objetivo ISO de 16/14/11 para lubricación y de 17/15/12 para regulación.

Esta es la primera observación, ya que trae grandes implicaciones para los sistemas, un alto valor objetivo impacta en el deterioro del lubricante debido al control que ejercen los aditivos sobre las partículas, además de la posibilidad de cada partícula de generar desgaste en cadena. Por el contrario, un bajo y adecuado valor de código ISO aumenta la vida útil de los equipos.

Tabla 24. Comparación de los límites de conteo de partículas según ISO 4406:99

Valores de Limpieza Lubricación ISO 4406:99			Valores de Limpieza Regulación ISO 4406:99		
Valor Límite Laboratorio	Valor Analizado	Valor Recomendado	Valor Límite Laboratorio	Valor Analizado	Valor Recomendado
Aguazarcas			Aguazarcas		
19/17/14	18/15/9	18/15/12	19/17/14	15/11/9	18/16/13
19/17/14	19/15/10	18/15/12	19/17/14	15/11/9	18/16/13
Chocosuela			Chocosuela		
19/17/14	19/14/9	18/15/12	19/17/14	17/14/9	18/16/13
19/17/14	18/15/9	18/15/12	19/17/14	19/15/10	18/16/13
La Esperanza			19/17/14	17/14/9	18/16/13
19/17/14	15/12/9	18/15/12	La Esperanza		
19/17/14	19/16/10	18/15/12	19/17/14	18/14/10	18/16/13
19/17/14	15/12/7	18/15/12	19/17/14	17/14/10	18/16/13
19/17/14	18/16/12	18/15/12	Platanar		
Platanar			18/16/13	17/14/10	18/16/13
19/17/14	16/13/9	18/15/12			
19/17/14	18/15/9	18/15/12			

4.5.1 Extensión de la vida útil

En línea con lo anterior, en la Tabla 25 Noria brinda valores de extensión de vida útil en función de los cambios en los valores objetivos del conteo de partículas sólidas. Se puede apreciar que para los sistemas hidráulicos de regulación se puede aumentar 1.3 veces la vida útil si se mantienen los parámetros de limpieza estipulados por el proyecto, mientras que para la lubricación de los cojinetes esta puede aumentar en 1.5 veces la vida útil con respecto a la actual.

Estos valores se pueden mantener y lograr mediante pequeñas modificaciones observadas. Un mejor manejo del almacenamiento de los tambores de aceite nuevo y una mejor protección de ventilación permitirán lograr estos objetivos.

Tabla 25. Tabla de extensión de vida por partículas

		Nivel de Limpieza Nuevo - Proactivo (Código ISO)															
Nivel de Limpieza Actual - Pre - Proactivo (Código ISO)		*/20/17		*/19/16		*/18/15		*/17/14		*/16/13		*/15/12		*/14/11		*/13/10	
		5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7.5	>10	9	>10	>10
*/26/23	4	2.5	4.5	3	6	3.5	6.5	4	7.5	5	8.5	6.5	10	7	>10	9	>10
	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7	>10	9	>10
*/25/22	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	6.5	4	8	5	9	6	10	7.5	>10
	3	2	4	2.5	6	3	7	4	9	5	>10	6	>10	7	>10	8	>10
*/24/21	2.5	1.5	3	2	4	2.5	5	3	6.5	4	7.5	5	8.5	6	9.5	7	>10
	2	1.5	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10
*/23/20	1.7	1.3	2.3	1.5	3	2	3.7	2.5	5	3	6	3.5	7	4	8	5	>10
	1.6	1.3	2	1.6	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	8	4	>10	5	>10
*/22/19	1.4	1.1	1.8	1.3	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5.5	3.5	7	4	>10
	1.3	1.2	1.5	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10
*/21/18	1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.4	2.2	1.6	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	>10
			1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4	9
*/20/17			1.2	1.05	1.5	1.3	1.8	1.4	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	5	3	6
					1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7
*/19/16					1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.2	1.7	3	2	3.5	2.5	5
							1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5
*/18/15							1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3	2	3.5
									1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4
*/17/14									1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3
											1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3
*/16/13											1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3
													1.3	1.2	1.6	1.5	2
*/15/12													1.2	1.1	1.5	1.3	1.8
															1.3	1.2	1.6
*/14/11															1.3	1.2	1.6
																	1.4
*/13/10																	1.2

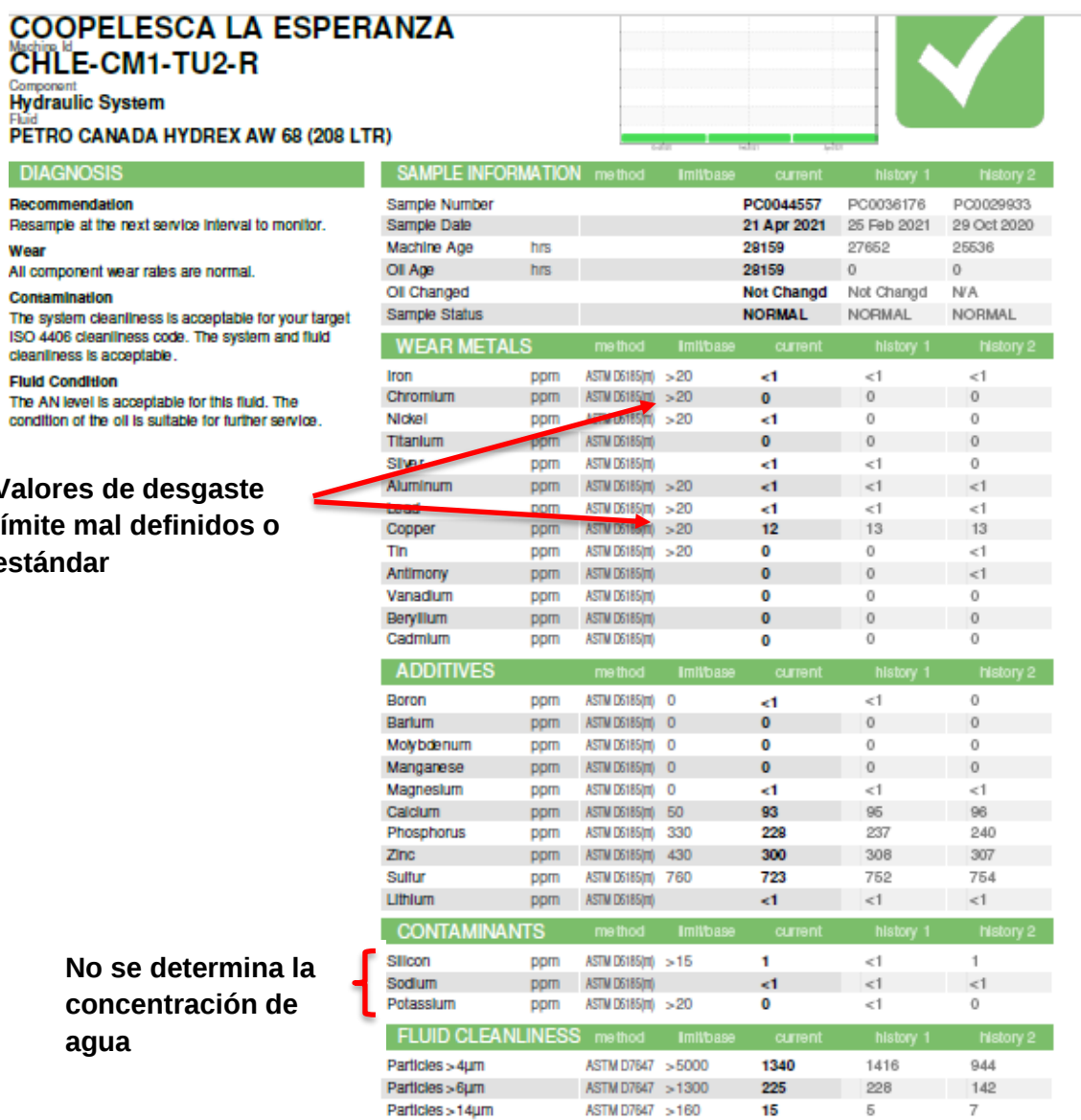
Fuente: Noria Corporation (2018).

4.5.2 Límites estándar y pruebas faltantes

La otra observación es que evidentemente no se llevan a cabo todas las pruebas determinadas en el proyecto como se observa en la Figura 32, por lo tanto, no se pueden abarcar muchos de los modos de falla definidos. En este punto se deben agregar las pruebas de conteo de partículas de agua, con su límite a 200 ppm, la prueba de oxidación y nitración por FTIR evaluado a un análisis nuevo.

Como última observación es tener referenciada y analizada una muestra de aceite nueva. Lo anterior para generar una adecuada línea base, ya que el laboratorio tiene definidos valores de las hojas de datos o valores estándar no ajustados a las condiciones específicas de trabajo de los equipos, también observado en la Figura 32.

Figura 32. Análisis de aceite de la CH La Esperanza



Fuente: Coopelesca R. L. (2021).

4.6 Guía para la toma de decisiones de un análisis de aceite

Una vez estipuladas todas las pautas y los requerimientos para su aplicación correcta, se desarrollan los diagramas de flujo para orientar y facilitar las decisiones al ingeniero encargado.

Inicialmente, se puede observar en la Figura 33 que mientras no existan parámetros fuera de los límites establecidos para los análisis de aceite, se considera un estado normal en el cual la acción es seguir monitoreando el equipo. Esto al tomar en cuenta que se debe llevar a cabo el análisis de los resultados para evaluar si se presenta tendencia de cambio en cualquiera de las variables dentro de salud, contaminación y desgaste.

En el momento en que se presenten parámetros anormales fuera de los límites establecidos se procede a seguir el diagrama a las secciones A, B o C según la variable que presenta anomalías. En la Figura 34 se puede apreciar el desarrollo de la sección A, la cual es la más variada, inicialmente se analiza la condición de la viscosidad al ser la característica más importante. De allí se procede a evaluar la concentración de partículas sólidas y la calidad de los aditivos para tomar decisiones de relleno de aceite nuevo o que existió un relleno por aceite equivocado que afectó únicamente a la viscosidad.

En caso de presentarse anomalía también en conteo de partículas sólidas se procede con el estudio del número ácido. Este valor puede verse afectado de muchas formas y permite diferencias entre deterioro normal del aceite por tiempo de uso o deterioro anormal por alta temperatura de trabajo, por contaminación sólida o contaminación con agua.

Para identificar la causa principal se procede a analizar concentración de agua, oxidación y nitración por FTIR. Es importante observar que, en ocasiones, la acción final viene de la mano con alguna prueba de excepción en caso de no existir total certeza de la posible falla que se está presentando.

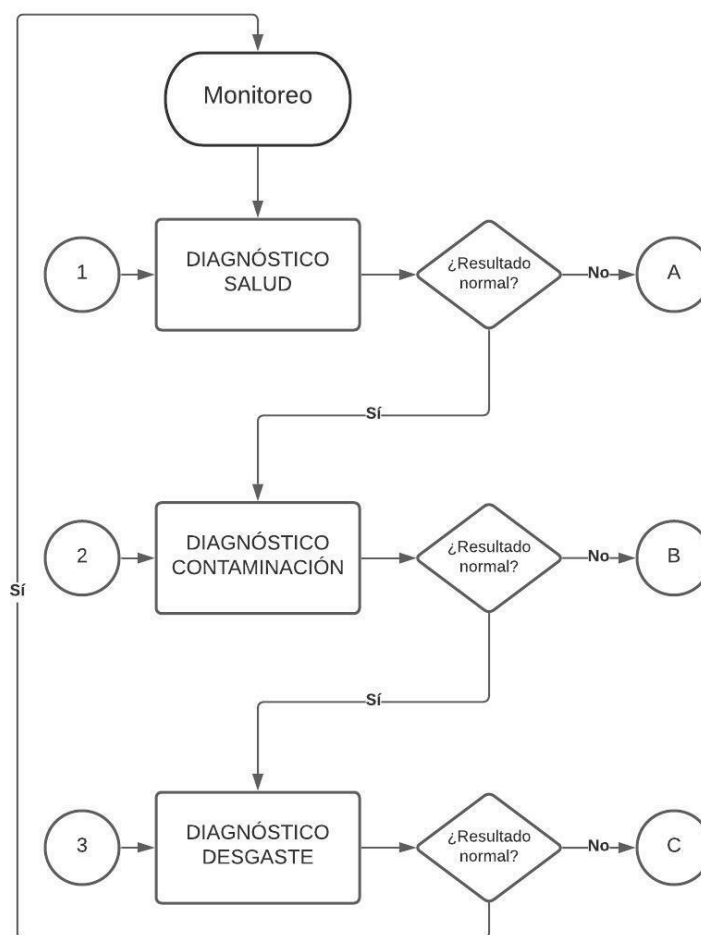
Por otra parte, en la Figura 35 se aprecian las secciones B y C, las cuales son más pequeñas, pero no por esto más simples. En el caso de la sección B presentada cuando hay anomalías en los parámetros de contaminación, es evidente que la primera condición por evaluar es la concentración de agua. Posteriormente, se debe hacer el análisis de la tendencia de las concentraciones de contaminación para identificar la falla. En caso de presentarse aumento significativo de silicio o aluminio es causado por contaminación exterior de polvo y tierra.

En el caso de la sección C presentada cuando hay anomalías en los parámetros de desgaste, se debe evaluar la tendencia de las partículas presentadas para ubicar la causa raíz. De no ser posible se contrasta con el análisis de vibraciones de los equipos y se procede a las pruebas de excepción para determinar partículas ferromagnéticas según DRF y partículas ferromagnéticas por inducción magnética el índice PQ.

En caso de no evaluar la causa raíz con estas herramientas se procede con el método de ferrografía analítica. Como se menciona en la teoría, identifica la forma, tipo y procedencia de las partículas de desgaste de una forma precisa y exacta.

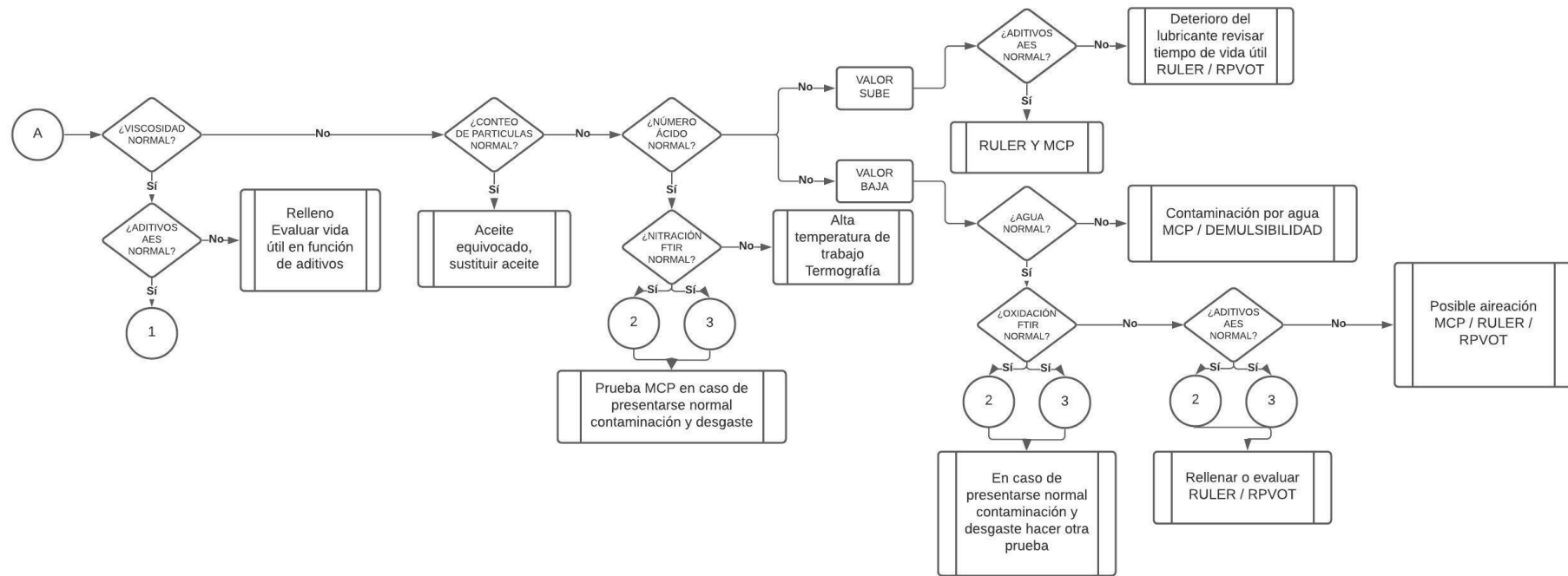
Es importante mencionar que lo ideal es contar con un especialista calificado con bases en aceites, tribología y análisis de aceite. Lo anterior se debe a que los diagramas presentan un panorama específico de flujo, mientras que las condiciones reales pueden significar otras fallas no abarcadas por el proyecto.

Figura 33. Diagrama de flujo inicial para toma de decisiones



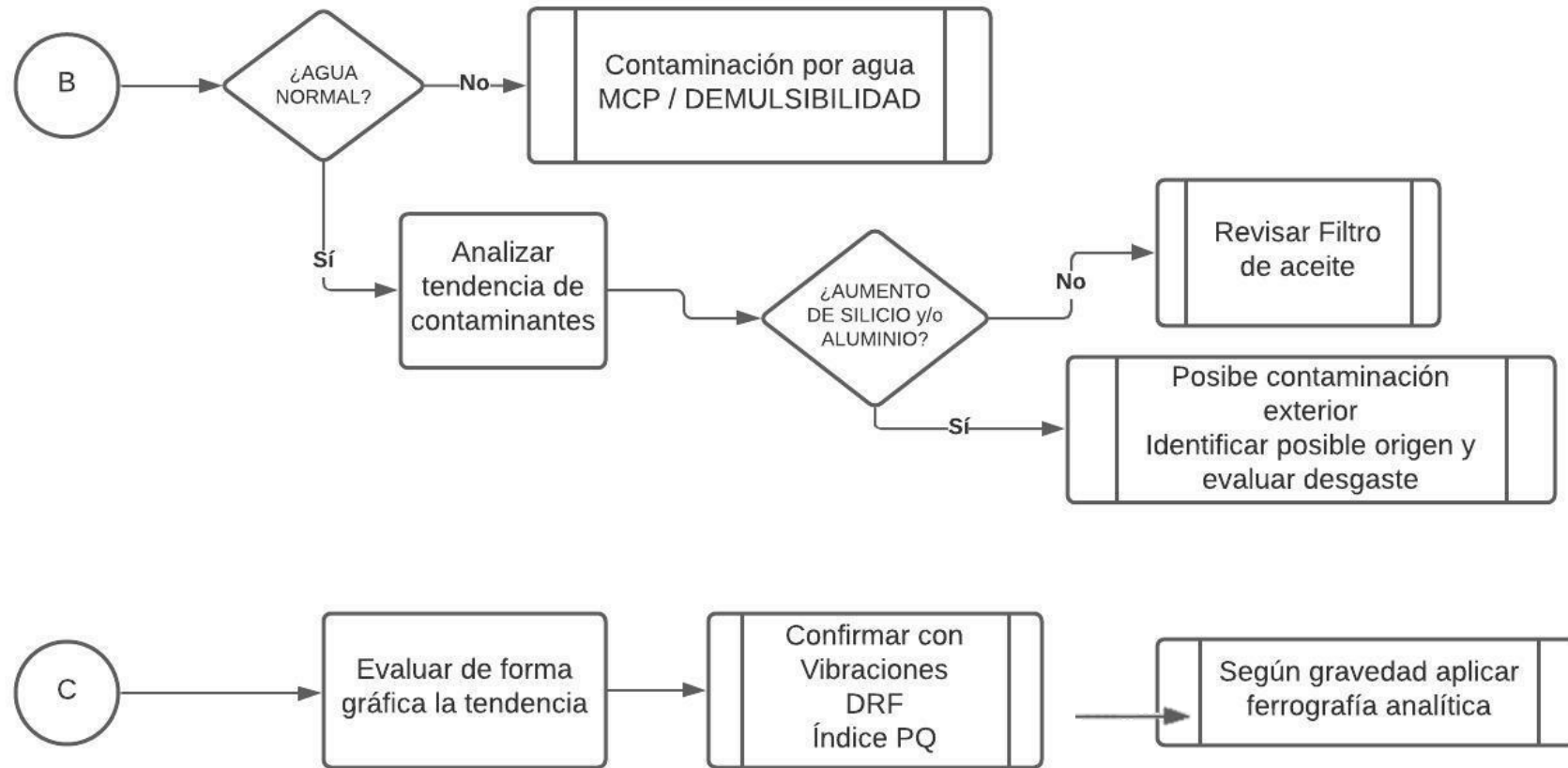
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Diagrama de flujo para toma de decisiones, sección A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Diagrama de flujo para toma de decisiones, sección B y C



Fuente: Elaboración propia.

4.7 Análisis costo-beneficio

Para el desarrollo de la evaluación financiera se llevó a cabo la aplicación del estudio de mercado, el estudio técnico y el estudio financiero con sus indicadores de inversión como TIR, VAN y retorno de la inversión.

4.7.1 Estudio de mercado

Con el estudio de mercado se identificaron todas las variables que impactan de manera directa la propuesta y que deben tomarse en cuenta para obtener un adecuado costo de implementación y desarrollo del proyecto.

Lubricantes: Como se evidencia en capítulos anteriores, fue necesario identificar las características fisicoquímicas de los diferentes tipos de lubricantes que se utilizan en las centrales hidroeléctricas, tanto los de lubricación como los de regulación y su precio de compra.

Tabla 26. Precios de los lubricantes

Lubricante	Precio
Aceite hidráulico biodegradable Environ AW68	¢706.358,88
Aceite hidráulico biodegradable Environ AW46	¢717.428,63
Aceite Turboflo XL68 205L	¢682.985,95

Fuente: Departamento de Compras Coopelesca R. L. (2020).

Filtros: Se identificaron los filtros y los precios para los filtros que utilizan las centrales hidroeléctricas. Según tamaño y tipo de maya pueden variar entre los ¢50.000 y los ¢170.000, además, se cotizó el costo para la implementación de los respiraderos con filtros desecantes (acción importante que se recomienda implementar lo más pronto posible).

Tabla 27. Precios de los filtros

Filtro	Precio
Respirador hidráulico Triceptor (deseicante)	¢81.877,22
Filtro Parker 40micras	¢50.580,10
Filtro Parker 10micras	¢98.903,67
Filtro Parker 5micras	¢136.000,00
Filtro hidráulico H10XL	¢176.566,30

Fuente: Departamento de Compras Coopelesca R. L. (2020).

Laboratorios para los análisis de aceite: La selección del laboratorio es muy importante, debido a que la forma de brindar el servicio, los tiempos de respuesta y el acompañamiento impactarán positiva o negativamente el desarrollo del programa de lubricación. Se cotizaron en el ámbito nacional laboratorios, sin embargo, solo ofrecen servicios para análisis de aceite para motores de combustión.

Por lo tanto, los precios de las tres primeras cotizaciones son a través de terceros que tienen contacto con laboratorios en Estados Unidos y la cuarta cotización fue directamente con un laboratorio con casa matriz en Brasil y sede de habla hispana en Chile. También es importante mencionar que los precios que se muestran en la siguiente tabla corresponden al precio de las pruebas para una sola muestra.

Tabla 28. Cotizaciones de los análisis de aceite

Contacto/Laboratorio	Precio
Predictivo especializado (paquete básico)	¢74.970,00
Predictivo especializado (pruebas específicas)	¢477.540,00
Central de mangueras	¢28.350,00
Laboratorio ALS Chile	¢17.640,00

Nota: Existe una diferencia de precios significativa debido primero al paquete de pruebas que se llevan a cabo y segundo por ser intermediarios entre el cliente y el laboratorio para las tres primeras opciones (ver Anexo 9 para más detalle).

Como es evidente, la cotización directa con el laboratorio ALS presenta la mejor opción económicamente. Además, brindan un acompañamiento más directo y no a través de terceros.

4.7.2 Estudio técnico

En el presente estudio técnico se llevó a cabo la recopilación de costos asociados con las centrales hidroeléctricas en cuanto a gastos anualizados del consumo de lubricante, del consumo de filtros y de labores de mantenimiento, además del costo por hora de mano de obra y el costo de producción de la energía eléctrica. En el Apéndice H se aprecian todos los datos mencionados.

4.7.2.1 Inversión inicial

Una vez que se obtienen y ordenan los datos se logra estimar el costo de la inversión del programa de lubricación. A modo de ejemplo en la Tabla 29 se observa la inversión inicial para la central de La Esperanza, la cual tiene variables que solo se toman una sola vez, en el momento de iniciar la implementación y variables que se deben asumir anualmente.

Tabla 29. Inversión para implementar el programa de lubricación en la CH La Esperanza

Costo/unidad	Inversión o implementación	En proceso (anual)
Desarrollo del programa	¢500.000,00	
Instalación de puertos de muestreo*	¢3.296.888,00	
Capacitaciones y entrenamientos	¢453.600,00	
Actualización de respiradores	¢471.858,00	
Análisis de aceite**		¢423.858,00
Personal encargado		¢600.000,00
Elementos filtrantes		¢315.000,00
Elementos de respiradores		¢80.000,00
Labores de mantenimiento		¢62.500,00
Actualización de conocimientos		¢126.000,00
TOTAL	¢4.722.346,00	¢1.606.860,00

Notas: *Cotización de implementación de puertos de muestreo (ver Anexo 10 para más detalle).

**Al tomar en cuenta el precio del laboratorio ALS para seis muestras trimestrales, las necesarias para evaluar cada unidad hidráulica de los dos conjuntos turbogeneradores.

El costo total de implementación total es de **¢6.329.206,00** para la central de La Esperanza. La variable de mayor impacto económico es la instalación de los puertos de

muestreo y, posteriormente, el personal a cargo, el desarrollo de este programa y los análisis de aceite. Los puntos de muestreo son indispensables para iniciar con la toma de muestra adecuada y junto con los primeros análisis de aceite se empieza a generar un historial de condición en los equipos para su análisis posterior.

4.7.2.2 Estimación de ganancias por reducción de fallas

Caso 1: Un primer cálculo grueso del costo-beneficio se lleva a cabo tomando en cuenta el escenario de la falla crítica. En la Tabla 30 se muestra el costo del mantenimiento correctivo realizado por la reparación de eje, el cambio de cojinete y de acople, además de los 15 días de paro del conjunto turbogenerador para un total aproximado de 75 000 000 de colones.

Por otra parte, si se hubiera contado con el programa de lubricación y según los estudios de casos de Noria las fallas críticas han llegado a reducirse considerablemente a fallas leves para cojinetes. Una falla leve pudo haber sido reparada en aproximadamente una semana con un costo total de 22 000 000 de colones, según lo visto en la Tabla 4 y los costos por producción de la Tabla H4, sumando el total del programa de lubricación alcanza un total de 26 000 000 de colones.

Tabla 30. Ganancia del caso 1 al implementar el programa de lubricación

Tipo de mantenimiento	Recursos	Valor	Total
Predictivo	Programa de lubricación	¢3.811.662,37	¢26.556.585,97
	Falla leve	¢22.744.923,60	
Correctivo	Falla	¢8.500.000,00	¢78.178.015,70
	Producción	¢69.678.015,70	
Valor ahorrado			¢51.621.429,72

El gasto asumido por la empresa para esta falla equivale a casi tres veces el gasto si se hubiera contado con un programa de lubricación y se hubiera detectado la falla a tiempo,

para un valor de ₡51.621.429,72. Solo esta ganancia puede soportar el costo de 13 años del programa de lubricación.

Este caso es muy específico y, aunque existe posibilidad de suceder, se presentó una vez en 20 años que tiene el equipo trabajando. Por lo tanto, sí presenta un panorama posible y evidencia el impacto del programa de lubricación, pero existe una forma más de acuerdo con la realidad según el año de fallas en estudio.

Caso 2: Este segundo cálculo de costo-beneficio es más preciso porque toma tres escenarios de fallas, la falla crítica estudiada, la falla moderada y la falla leve, estas dos últimas se clasificaron a partir del registro de fallas, según su impacto. Además, se le asocia un valor teórico de probabilidad de la falla sin el análisis de aceite según el documento *Cuantificación de los beneficios del análisis de aceite* de Machinery Lubrication (2000) y una probabilidad de falla con la implementación del programa de lubricación y el análisis de aceite. En la Tabla 31 se evidencian nuevamente los costos por paro, el costo de los repuestos y las horas hombre asociadas con cada falla y su valor ponderado.

Tabla 31. Ganancia del caso 2 al implementar el programa de lubricación

Costo	Falla severa	Falla moderada	Falla leve	Costo ponderado
Por paro productivo	₡69.678.015,70	₡31.591.877,76	₡6.989.702,95	
Repuestos	₡8.500.000,00	₡5.800.000,00	₡1.382.983,98	
Horas hombre	₡375.000,00	₡200.000,00	₡50.000,00	
Total	₡78.553.015,70	₡37.591.877,76	₡8.422.686,93	
Probabilidad sin AA	15 %	30 %	55 %	
Ponderado	₡11.782.952,35	₡11.277.563,33	₡4.632.477,81	₡27.692.993,49
Probabilidad con AA	5 %	10 %	85 %	
Ponderado	₡3.927.650,78	₡3.759.187,78	₡7.159.283,89	₡14.846.122,45
Valor ahorrado				₡12.846.871,04

El valor ponderado representa un valor basado y respaldado por estadística que engloba las fallas recopiladas por el presente proyecto en un año, lo que da como resultado un valor más centrado a la situación en estudio obteniendo una ganancia anual de ₡12.846.871,04. Este valor es mucho menor, pero se ajusta más a la realidad de las centrales hidroeléctricas del proyecto.

4.7.3 Estudio financiero

El estudio financiero presenta los indicadores de inversión al evaluar las propuestas a un año. Este se llevó a cabo mediante Microsoft Excel, en el cual se desglosaron las ganancias, los costos de implementación, con crecimiento de gastos de aproximadamente un 4 % según los últimos datos de la inflación nacional (IPC Costa Rica, 2021 y Agencia EFE, 2021) y se desglosó la inversión (ver Apéndice I para más detalles). Para cada escenario se obtuvieron los siguientes indicadores:

Tabla 32. Indicadores financieros del proyecto de lubricación

Caso 1		Caso 2	
TMAR	10%	TMAR	10%
VNA	₡ 37,290,902.09	VNA	₡ 6,181,116.69
VAN	₡ 23,505,034.17	VAN	₡ 1,458,770.69
TIR	38.9%	TIR	16.0%
PR	4 meses	PR	10 meses
% de ganancia	170.5%	% de ganancia	30.9%
ID	271%	ID	131%

En la Tabla 32 se evidencia que el escenario 1 presenta mejores indicadores con un VAN de 23 000 000 de colones, una TIR bastante buena de 38.9 % y un periodo de recuperación de 4 meses. Sin embargo, el escenario 2 igualmente tiene números favorables con un periodo de recuperación de la inversión en 10 meses. Este análisis evidencia el beneficio que puede traer la implementación de un buen programa de lubricación si se siguen todas las pautas mencionadas en los apartados anteriores.

4.7.4 Escenarios y probabilidad del proyecto

Para mayor validación de un proyecto financiero ante la Gerencia se debe llevar a cabo la evaluación de escenarios del proyecto. Estos escenarios son aproximaciones de probabilidad a posibilidades que se pueden presentar durante la implementación de un proyecto, entre los cuales para el desarrollo de un programa de lubricación se puede apreciar tres variables.

En la Tabla 33 se observa primero el porcentaje de mejora de la lubricación, el cual afecta el compromiso que la empresa tome, donde se puede apreciar que se toman 3 porcentajes de mejora, un 10 % para el caso pesimista, el cual es asumiendo poco interés y seguimiento al programa de lubricación, el 50 % al seguir los procesos establecidos en el presente proyecto y un 70 % en el caso optimista de que este programa se lleve al siguiente nivel proactivo, implementando las acciones aquí mencionadas y las recomendaciones extras.

Además, se toma en cuenta la variación en los gastos, estos están ligados a precios de repuestos para mantenimientos, las horas de paro y la mano de obra de los técnicos y como última variable los costos de la inversión inicial. Esto se debe a variaciones del alza en los precios de equipos, análisis de aceites, filtros y otros, detallado en la Tabla 29.

Tabla 33. Datos de la evaluación de escenarios financieros

Escenarios	Pesimista	Normal	Optimista
Probabilidad	35%	50%	15%
Porcentaje de Mejora	10%	50%	70%
Aumento de Gastos	10%	4%	0%
Aumento de Inversion	15%	2%	0%
VAN	19,369,133.20	23,505,034.17	25,171,962.64
TIR	33%	39%	41%

A partir de estos datos y mediante estadística en función del resultado de VAN y TIR para cada escenario, el proyecto logra asumir 3 desviaciones estándar lo que demuestra una confianza del 99.74 %. Por lo tanto, se puede asumir, hasta cierto nivel, un escenario

pesimista, lo que demuestra su gran beneficio a las centrales hidroeléctricas (ver Apéndice J para mayor detalle del cálculo de escenarios y probabilidad). Sin embargo, estos valores se determinan al asumir ciertas suposiciones.

4.7.5 Definición de supuestos

En este apartado se enuncian las suposiciones realizadas para el estudio de costo beneficio:

- El estudio realizado de la implementación del programa es necesario y aplicable, el impacto de la humedad y la contaminación en el aceite tiene respaldo histórico de casos y *data* suficiente para esperar una mejora de al menos un 50 % en las fallas ligadas a lubricación. Además, se estimó un 4 % para el aumento en los gastos por fallas y un aumento del 2 % en la inversión del proyecto.

- Las cotizaciones y estimaciones de los precios en la configuración del programa de lubricación son precisas y actualizadas al año 2021.

- En el caso 1 que presenta un estudio más aislado se toma en cuenta la inversión del programa, además de la ganancia de la falla crítica y las fallas menores.

- Además, el caso 1 presenta mayor impacto y evidencia económicamente las consecuencias de no implementar el programa de lubricación. Sin embargo, está respaldado por un solo hecho histórico.

- El caso 2 toma porcentajes de probabilidad de referencias teóricas para eventos de fallas precisos. La única variable significativa es el costo de las pruebas de rutina que se realizan ocasionalmente.

- El análisis no toma en cuenta los equipos para análisis de pruebas en sitio, ya que es una herramienta que no es concluyente ni debe ser la base de un programa de lubricación.

4.8 Software de predicción

El *software* de predicción presenta las estimaciones realizadas en el *software* Wolfram y el cálculo de mejora en la disponibilidad. Lo anterior a partir de las fallas presentadas en el último año, definidas en la Tabla 5.

4.8.1 Estimación de disponibilidad actual durante falla sin el programa de lubricación

A partir de las fallas del último año presentadas en las centrales hidroeléctricas se determinó el promedio, la desviación estándar y los valores mínimos y máximos para los tiempos de fallas (ver apéndice K). De esta manera, se puede ejecutar una distribución en el comando *RandomVariate* del *software* Wolfram para generar un valor aleatorio a partir de la distribución definida. Como se aprecia en la Figura 36 el comando necesita una distribución o un arreglo de datos para tomar un número aleatorio. La distribución normal con promedio de 64.75 y desviación estándar de 14.02 es la que presentan las fallas del último año.

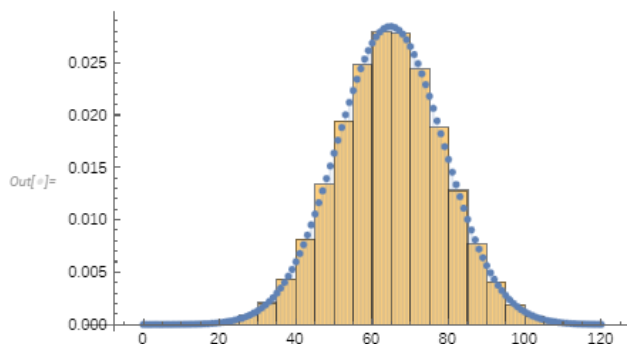
A partir de aquí es necesaria una cantidad más significativa de datos para generar la función de densidad de probabilidad, que como se explica en el marco teórico es la que más se utiliza para estimaciones de fallas. Por lo tanto, en la Figura 37 se puede apreciar que se le asigna a la variable *data* un arreglo de datos aleatorios de cantidad 10^7 según la distribución normal. Una vez obtenidos los datos, el comando -Histogram- grafica un histograma representado con las barras de color naranja y el comando -PDF- muestra la función de densidad de probabilidad, representada con los puntos azules.

Figura 36. Código para cálculo de valor aleatorio Wolfram

```
In[ ]:= RandomVariate[NormalDistribution[64.7569, 14.02]]
Out[ ]:= 76.1505
```

Figura 37. Función de densidad de probabilidad para las fallas sin el programa de lubricación

```
In[ ]:= data = RandomVariate[NormalDistribution[64.7569, 14.02], 10^7];
Show[
  Histogram[data, Automatic, "ProbabilityDensity"],
  DiscretePlot[PDF[NormalDistribution[64.7569, 14.02], x], {x, 0, 120},
    PlotStyle -> PointSize[Medium]]]
```



El resultado de esta función de densidad de probabilidad es un valor de entre 60 y 70 h para las fallas como valor más probable. Este es el valor de tiempo medio de reparación (MTTR) por utilizar en la ecuación de disponibilidad. Por lo tanto, el otro factor por necesitar es el tiempo medio entre fallas MTBF, el cual está determinado de la siguiente forma:

$$MTBF = \frac{\text{Horas totales}}{\text{Número de fallas}}$$

Las horas totales son las horas de los 365 días del año en estudio que equivalen a $365\text{días} \times 24\text{ h} = 8760\text{ h}$ multiplicadas por 82 % (este valor es el porcentaje promedio de trabajo de una central hidroeléctrica en un día, valor afectado únicamente por las horas de relleno de agua del embalse) y el número total de fallas de los datos de la Tabla 5.

$$MTBF = \frac{8760 * 82\%}{79} = 90.92\text{hrs}$$

Por lo tanto, la disponibilidad $R(t)$ en los casos de fallos de la central hidroeléctrica sin el programa de lubricación es la siguiente:

$$\text{Disponibilidad } R(t) = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$$

$$R1(t) = \frac{90.92 - 60}{90.92} * 100 = 34.01 \%$$

$$R2(t) = \frac{90.92 - 70}{90.92} * 100 = 23.01 \%$$

Estos valores representan la disponibilidad que puede presentar el conjunto turbogenerador en caso de presentarse fallas en los sistemas hidráulicos, esto sin implementar el programa de lubricación. En el apartado siguiente se realiza el cálculo, pero con la implementación del programa de lubricación.

4.8.2 Estimación de disponibilidad futura durante falla con el programa de lubricación

De igual manera, se lleva a cabo el cálculo mediante la generación de variables aleatorias, sin embargo, para obtener el beneficio asignado a la variable *prub* de la Figura 38 se asume un rango de entre 40 y 60. Este es el rango de porcentaje teorico-práctico tomado en cuenta según los casos de estudio de Noria (Troyer, 2000) y (Noria Corporation, 2018), los cuales estiman beneficios de hasta 75 %. “La investigación en el área sugiere que limpiar el aceite de nuestros niveles de contaminación actuales a los nuevos niveles de limpieza objetivo reducirá la frecuencia de fallas de los cojinetes en un 75%”. Lo anterior logrado a partir de un gran esfuerzo de 3 años en el programa de lubricación del caso investigado.

Por este motivo, este rango entre 40 y 60 es aceptable para un estimado del efecto que puede traer al presente proyecto. Posteriormente, en la variable *calc* de esta Figura 38 se almacena el arreglo de valores proveniente de los datos del último año multiplicado a la moda de los datos de porcentaje y generados.

En la variable *ld* se asigna un nuevo comando el *LearnDistribution*, el cual determina automáticamente la distribución aproximada, a partir de los datos provenientes de la

variable anterior. Con esto se puede generar el histograma y la función de densidad de probabilidad de la Figura 39 (ver apéndice K para más detalle).

Figura 38. Generación de datos para confiabilidad con el programa de lubricación en el software Wolfram

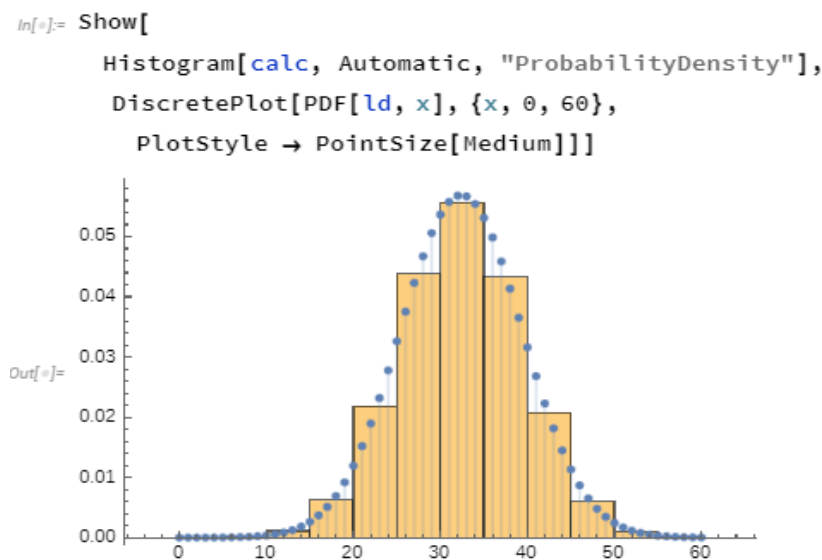
```

In[ ]:= prub = RandomReal[{40, 60}, 10^5]

In[ ]:= calc = RandomVariate[NormalDistribution[64.7569, 14.02], 10^5] * (mode / 100)
ld = LearnDistribution[calc]

```

Figura 39. Función de densidad de probabilidad para las fallas con el programa de lubricación



El resultado de esta función de densidad de probabilidad es un valor entre 30 y 35 h como valor más probable. Con este nuevo valor de MTTR y al aplicar el mismo cálculo anterior se obtiene:

$$R3(t) = \frac{90.92 - 30}{90.92} * 100 = 67.00 \%$$

$$R4(t) = \frac{90.92 - 35}{90.92} * 100 = 61.50 \%$$

Lo anterior muestra valores de disponibilidad para el conjunto turbogenerador significativamente más altos que sin la implementación de un programa de lubricación.

4.8.3 Resultado del beneficio en la disponibilidad durante falla

A partir de los datos anteriores se lleva a cabo un mapeo que resulta en la Tabla 34, la cual toma cada confiabilidad calculada y realiza una resta para obtener el beneficio neto de la implementación del programa de lubricación. De este mapeo se toma el dato del cuadrante I (32.99 %) y el dato del cuadrante V (38.49 %) para sacar el valor puntual, obteniendo como resultado un beneficio del 35.74 % (± 2.75 %), además de un posible mínimo de 27.49 % y un posible máximo de 43.99 %.

Tabla 34. Beneficio del programa de lubricación en una central hidroeléctrica

		Confiabilidad de Fallas sin Programa de Lubricación	
		34.01%	23.01%
Confiabilidad de Fallas con Programa de Lubricación	67.00%	32.99%	43.99%
	61.50%	27.49%	38.49%

Con este valor de mejora se estima que, solo por temas de paros productivos, la empresa habría ahorrado ¢15.508.165,65 en el último año, ya restándole el valor de implementar el programa de lubricación (ver Gráfico K4 y Tabla K1). Por lo tanto, se evidencia y se comprueba que un programa de lubricación que se basa en el análisis de aceite permite a las centrales hidroeléctricas mejorar la disponibilidad del conjunto turbogenerador. Además, genera importantes beneficios económicos a la empresa distribuidora de energía eléctrica.

5 Cap. V. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Las conclusiones de la investigación son las siguientes:

- El proyecto logra analizar y estimar el beneficio de implementar el programa de lubricación en la disponibilidad del conjunto turbogenerador, mediante el desarrollo de un modelo matemático estadístico en el programa Wolfram, superando el 30 % de beneficio.
- Se evidencia que la falta de un programa de lubricación puede repercutir directamente en las condiciones de operación de los equipos, asumiendo costos que rondan los ¢12.000.000 por fallas y pérdidas económicas por paros de producción de hasta ¢15.000.000.
- Mediante el estudio de datos se concluye que las centrales mantienen una disponibilidad muy alta (mayor a 91 % en promedio anual), pero se presentan situaciones de falla, ligadas a la lubricación, que llevan a una reducción significativa de la disponibilidad al no contar con un programa de lubricación capaz de contrarrestarlas.
- Se logran determinar los valores límites condenatorios para los parámetros Sacode de cada aceite que se utilizan en las distintas centrales hidroeléctricas, en función de la normativa ASTM-D 4378-97 y recomendación de los expertos de Noria Corporation. Estos límites son más estrictos en comparación con los recomendados por el laboratorio actual.
- El proyecto logra detallar las acciones de control por seguir para cada modo de falla y hace hincapié en dos situaciones por las cuales se puede presentar fricción entre el cojinete y el eje debido a la contaminación. Estas son las

condiciones de almacenamiento de los tambores nuevos y el uso de respiradores poco eficientes en las cubas de las unidades hidráulicas.

- De acuerdo con el estudio financiero se demuestra la viabilidad de la implementación del proyecto. En ambos escenarios se obtiene un VAN positivo, un TIR superior a 16 % y un periodo corto para el retorno de la inversión.

5.2 Recomendaciones

Para garantizar un adecuado análisis de aceite que logre determinar las fallas potenciales, se recomienda implementar los análisis de aceites nuevos, para definir de la mejor manera la línea base para los límites condenatorios.

Se recomienda tomar acción inmediata en la forma de almacenamiento de los tambores de aceite para asegurar su calidad de aceite nuevo, ya sea aislar la parte superior o almacenarlos en forma horizontal. Además, sustituir todos los tapones con filtros de las cubas por respiradores con filtros desecantes o cámaras de expansión, que aseguren la mínima entrada de partículas por aire contaminado del entorno.

Se recomienda contar con un encargado especializado del programa de lubricación que pueda llevar el estudio técnico de los análisis de aceite y sea capaz de suministrar las acciones de control pertinentes a la Gerencia, de forma eficaz.

Se recomienda capacitar al personal técnico que haga las tomas de muestreo, para una implementación correcta de las pautas que mejore la calidad de muestra. Además, se aconseja incentivar el cuidado y la importancia de mantener el aceite limpio, seco y fresco en las unidades hidráulicas.

Se recomienda trabajar siempre en la mejora continua y dar seguimiento al historial de fallas, para evidenciar de una mejor manera el beneficio que este programa de lubricación representa en el mantenimiento RCM.

6 Bibliografía

A-MAQ S. A. (2005). *Tutorial de ferrografía directa, análisis de elementos presentes y ferrografía analítica. Mantenimiento planificado.* http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20FERROGRAFIA.pdf

Acero Mundo. (s. f.). *Diferencias entre el acero inoxidable y el acero galvanizado.* Acero mundo. <https://aceromundo.com.mx/diferencias-entre-el-acero-inoxidable-y-el-acero-galvanizado/>

Agencia EFE. (2022, 07 de enero). *Costa Rica cerró el 2021 con una inflación del 3,30 %, la mayor desde 2014.* Agencia EFE. <https://www.efe.com/efe/america/economia/costa-rica-cerro-el-2021-con-una-inflacion-del-3-30-la-mayor-desde-2014/20000011-4713104#:~:text=COSTA%20RICA%20INFLACI%C3%93N-,Costa%20Rica%20cerr%C3%B3%20el%202021%20con%20una%20inflaci%C3%B3n%20del,30%20%25%2C%2>

Álvarez, C. (2015, 09 de marzo). *índice PQ - Particle Quantifier Index [PQI]. Hidroneumática Aplicada.* <https://hidroneumaticaaplicada.blogspot.com/2015/03/indice-pq-particle-quantifier-index-pqi.html>

ASTM D1401-19. (2019). Standard Test Method for Water Separability of Petroleum Oils and Synthetic Fluids. ASTM International. www.astm.org

ASTM D2270-10. (2016). Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C. and 100 °C. ASTM International. www.astm.org

ASTM D2272-14a. (2014). Standard Test Method for Oxidation Stability of Steam Turbine Oils by Rotating Pressure Vessel. ASTM International. www.astm.org

ASTM D5185-18. (2018). Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). ASTM International. www.astm.org

ASTM D6304-20. (2020). Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7279-20. (2020). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids by Automated Houillon Viscometer. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7412-18. (2018). Standard Test Method for Condition Monitoring of Phosphate Antiwear Additives in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7414-18. (2018). Standard Test Method for Condition Monitoring of Oxidation in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7527-10. (2018). Standard Test Method for Measurement of Antioxidant Content in Lubricating Greases by Linear Sweep Voltammetry. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7624-18. (2018). Standard Test Method for Condition Monitoring of Nitration in In-Service Petroleum and Hydrocarbon-Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7647-10. (2018). Standard Test Method for Automatic Particle Counting of Lubricating and Hydraulic Fluids Using Dilution Techniques to Eliminate the Contribution of Water and Interfering Soft Particles by Light Extinction. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7690-11. (2017). Standard Practice for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants by Analytical Ferrography. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7843-21. (2021). Standard Test Method for Measurement of Lubricant Generated Insoluble Color Bodies in In-Service Turbine Oils using Membrane Patch Colorimetry. ASTM International. www.astm.org

ASTM D7874-13. (2018). Standard Guide for Applying Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) to In-Service Lubricant Testing. ASTM International. www.astm.org

ASTM D8120-17. (2017). *Standard Test Method for Ferrous Debris Quantification*. ASTM International. www.astm.org

ASTM D8184-18e1. (2018). Standard Test Method for Ferrous Wear Debris Monitoring in In-Service Fluids Using a Particle Quantifier Instrument. ASTM International. www.astm.org

ASTM D974-21. (2021). Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. ASTM International. www.astm.org

Bestratén Belloví , M. y Orriols Ramos, R. M. (2018, 31 de julio). *NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos AMFE*. Consejo de Salud Ocupacional. https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20679%20-%20Análisis%20modal%20de%20fallos%20y%20efectos.%20AMFE.pdf

Bolaños, A. Z. (2021, 31 de mayo). Cotización de reparación de un cojinete.

Cabrera Ramón, E. F. y Tapia González, J. A. (2019). Propuesta de implementación de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la Unidad de Generación de la Central Saymirín. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17861/1/UPS-CT008458.pdf>

CBM - Mantenimiento Basado en la Condición. (23 de Enero de 2012). *Solo Mantenimiento*. <http://solomantenimiento.blogspot.com/2012/01/cbm-mantenimiento-basado-en-la.html>

Comas, G. (2011, 04 de enero). *Cojinetes de metal antifricción*. Inter empresas. https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html

Constante, B. M. (2021). Desarrollo de un plan de mantenimiento de las máquinas hidráulicas de generación eléctrica tipo francis para la central La Península mediante el mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. Repositorio UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32044/1/Tesis%20I.%20M.%20612%20-%20Lascano%20Constante%20Bolívar%20Marcel.pdf>

Coopelesca, R. L. (2020). *Coopelesca*. <https://www.coopelesca.com/nosotros/>

Corona, R. T. (2021, 02 de junio). *Consulta Emulsibilidad*.

Dudink, D. (2021, 26 de abril). Information RENK, Lubrication Project CR.

Ferrera Martínez, A. (s. f.). *Introducción a los Modelos Probabilísticos de la Función de Confiabilidad $R(t)$* . <https://predictiva21.com/modelos-probabilisticos-funcion-confiabilidad/>

Fitch, B. (2013). *Oil Analysis Explained*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29598/oil-analysis-report>

Fundación Endesa. (2013, 25 de enero). *Central Hidroeléctrica. Fundación Endesa*.
<https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica>

González, J. Q. (s. f.). *Análisis de aceite, pilar de monitoreo de condiciones y confiabilidad*. Docplayer. <https://docplayer.es/73275555-Analisis-de-aceite-pilar-de-monitoreo-de-condiciones-y-confiabilidad.html>

HBS Metalúrgica, S.A.C.I.I.y F. (s. f.). *Bombas rotativas y de engranes*. Bombas HBS.
<https://www.bombashbs.com.ar/productos.html>

Hepley, E. (2018, 1 de mayo). *Polaris Labs. Efectos del Barniz*.
<https://polarislabs.com/es/effects-of-varnish/>

Ingeniería de Mantenimiento Industrial y Servicios Integrales de Lubricación. (2010).
Ingeniería del Mantenimiento. Canarias: TBN.

IPC Costa Rica. (2021). *Datos Macro*. <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/costa-rica?sector=IPC+General&sc=IPC-IG>

Jim Fitch, D. T. (2013, 13 de noviembre). *Setting Limits and Targets for Effective Oil Analysis*. Machinery Lubrication.
<https://www.machinerylubrication.com/Read/28520/setting-oil-analysis-limits>

Lachnicht, P. (2021, 29 de abril). Information ZOLLERN, Lubrication Project CR.

Lascano Constante, B. (2021). *Desarrollo de un plan de mantenimiento de las máquinas hidráulicas de generación eléctrica tipo francis para la central La Península mediante el mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM*. Universidad Técnica Ambato.
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32044/1/Tesis%20I.%20M.%20612%20-%20Lascano%20Constante%20Bolivar%20Marcel.pdf>

León Lecca, L. F. (2017). *Mantenimiento proactivo basado en el análisis y monitoreo de aceite lubricante aplicado a la flota de tractocamiones freightliner*. Universidad Nacional de Trujillo. <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9492/LE%C3%93N%20LECCA,%20Luis%20Fernando.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Losada, C. (2006). *Tribología y lubricación en ensayo de banco*. Toluca: Red Ciencia Ergo Sum. <https://elibro.net/es/lc/biblioutn/titulos/18148>

Lubrication Management. (2016, 14 de julio). *Lubrication Management. Interpretar el valor del análisis del conteo de partículas*. <https://lubrication-management.com/2016/07/14/interpretar-el-valor-del-analisis-del-contejo-de-particulas/>

Luchiarri, G.; Bodner, A. y Lantos, E. (2018). *Interpretación de análisis de lubricantes*. Noria Corporation. <https://docplayer.es/68773552-Interpretacion-de-analisis-de-lubricantes.html>

Martínez Jiménez, B. L.; Pozo Morejón, J. A.; Rodríguez Rico, I. L.; Martínez Martínez, R.; Herrera Artilles, A. M. y Cabral Leite, J. (2014). Análisis de aceite en motores de combustión interna estacionarios de planta de generación de energía eléctrica. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(3), 206-212. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000300003&lng=es&tlng=es

Martínez López, J. (2014). *Generación de un plan de mantenimiento basado en informes de análisis de aceite, lubricante en motores Cummins ISX®*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2795/Mart%C3%ADnezjulian2014.pdf?sequence=1>

Martínez, A. F. (s. f.). *Introducción a los Modelos Probabilísticos de la Función de Confiabilidad (R.(t))*. Predictiva 21. <https://predictiva21.com/modelos-probabilisticos-funcion-confiabilidad/>

Mobil. (s. f.). *Cómo almacenar correctamente tambores de aceite en interiores*. Mobil Mx. <https://www.mobil.com.mx/es-mx/lubricantes/industrial/lubricant-expertise/resources/properly-store-oil-drums-indoors>

Noria Corporation. (2003). *How to Create an Effective Oil Analysis Test Slate*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/433/oil-analysis-test-slate>

Noria Corporation. (2003). *Oil Sample Bottle Cleanliness: Is a New Standard Needed?* Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/454/bottle-cleanliness-standard>

Noria Corporation. (2006). *Systematic Oil Analysis Interpretation*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/915/oil-analysis-interpretation>

Noria Corporation. (2011). *Pre-Flush for Better Oil Samples*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28665/pre-flush-for-better-oil-samples->

Noria Corporation. (2013, 21 de noviembre). *¿Qué tan importante es el código de contaminación sólida ISO 4406:99?* Noria. <https://noria.mx/lublearn/que-tan-importante-es-el-codigo-decontaminacion-solida-iso-440699/>

Noria Corporation. (2014, 04 de agosto). *Espectrometría infrarroja por transformadas de fourier*. Noria. <https://noria.mx/lublearn/espectrometria-infrarroja-por-transformadas-de-fourier/>

Noria Corporation. (2016, 2 de marzo). *Cómo maximizar los intervalos de cambio de aceite*. Noria Corporation. <https://noria.mx/lublearn/como-maximizar-los-intervalos-de-cambio-de-aceite-2/>

Noria Corporation. (2016, 20 de mayo). *Cómo establecer las frecuencias para el análisis del lubricante*. Noria Corporation. <https://noria.mx/lublearn/como-establecer-las-frecuencias-para-el-analisis-del-lubricante/>

Noria Corporation. (2016, 30 de diciembre). *Cómo administrar el almacenamiento de sus lubricantes*. Noria Mx. <https://noria.mx/lublearn/como-administrar-el-almacenamiento-de-sus-lubricantes/>

Noria Corporation. (2018). *Análisis de Lubricante*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Magazine/Archive>

Noria Corporation. (2020, 3 de mayo). *Cuáles botellas de muestreo son las mejores*. Noria. <https://noria.mx/cuales-botellas-de-muestreo-son-las-mejores/>

Noria Corporation. (2020, 7 de febrero). *Cómo la tasa de oxidación afecta la frecuencia de cambio de aceite*. Noria. <https://noria.mx/como-la-tasa-de-oxidacion-afecta-la-frecuencia-de-cambio-de-aceite/>

Noria Corporation. (s. f.). *How to Establish Oil Analysis Frequency*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29812/oil-analysis-frequency>

Noria US. (2015, 15 de abril). *Tips for Flushing Your Oil Sampling Equipment*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=T1DADJFN01g>

Noria. (2020, 3 de mayo). *Cuáles botellas de muestreo son las mejores*. Noria Mx. <https://noria.mx/cuales-botellas-de-muestreo-son-las-mejores/>

Ochoa, J. F. (2014). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar el factor de disponibilidad de la. Repositorio UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/>

- Owls Academy. (2017, 19 de marzo). *Parámetros de la función exponencial*. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=xQVRCboQD80&t=3s>
- Pall Corporation. (2007). *Guía rápida análisis de aceites*. www.pall.com
- Pickle, J. (2012). *Advantages of Proper Lubricant Storage*. Machinery Lubrication.
<https://noria.mx/lublearn/ventajas-de-un-adecuado-almacenamiento-de-lubricantes/>
- Pistarelli, A. J. (2013). *Manueal de Mantenimiento*. Pistarelli. <https://pistarelli.com.ar/>
- Processing. (s. f.). *Software Processing*. <https://processing.org/>
- Realiability Web. (s. f.). *Principios básicos sobre cojinetes*. Reliability Web.
<https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/principios-basicos-sobre-cojinetes>
- Salazar, J. (2017, 12 de octubre). *Almacenamiento y Manejo de Lubricantes*. Atacori.
https://www.atacori.co.cr/biblioteca/PPT_Manejo_y_Almacenamiento_de_Productos_Sep_2017.pdf
- Shaanxi World Iron & Steel Co. (2018, 05 de junio). *Acero galvanizado*. World Ironsteel. <http://es.worldironsteel.com/news/is-it-possible-that-the-galvanized-steel-pipe-15162788.html>
- Soutullo, R. G. (2021, 6 de septiembre). *Teoría de Lubricantes*. Ingeniero Marino.
<https://ingenieromarino.com/lubricantes-tribologia/>
- Terradillos, J. e Ignacio Ciria, J. (2013). *Todo sobre la lubricación de las turbinas y su mantenimiento a través del análisis del aceite*. Lubrication Management.
https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/An%C3%A1lisis_aceite_turbinas_ES.pdf
- Thibault, R. (2001). *Converting to Condition-Based Oil Changes - Part, I*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/147/condition-based-oil-changes>

Torres, E. (2014, 16 de marzo). *Tribología y Lubricación*. Scrib. <https://es.scribd.com/doc/13318734/TRIBOLOGIA-Y.-LUBRICACION>

Tribologik. (s. f.). *Ensayos*. <http://www.milesanalysis.com/infos/htdocs/ABOUT.php?lang=es§ion=TESTING>

Trout, J. (2019, 17 de septiembre). *Guía para seleccionar accesorios de muestreo de aceite*. Noria. <https://noria.mx/guia-para-seleccionar-accesorios-de-muestreo-de-aceite/>

Troyer, D. (2000). *The Buck Stops Here - Quantifying the Benefits of Oil Analysis*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/30/oil-analysis-benefits>

Trujillo, G. (s. f.). *Interpretación de análisis de lubricante*. Machinery Lubrication. <https://docs.micanaldepanama.com/congreso/GERARDO-TRUJILLO-1-Congreso-Panama-Interpretacion.pdf>

Weisstein, E. W. (2022, 4 de marzo). *Función de Densidad de Probabilidad*. MathWorld, un recurso web de Wolfram. <https://mathworld.wolfram.com/ProbabilityDensityFunction.html>

Wenzel, R. y Lilly, E. (2016). *Herramientas para prevenir fallas en las máquinas - mantenimiento basado en condición*. <https://cmc-latam.com/herramientas-para-prevenir-fallas-en-las-maquinas-mantenimiento-basado-en-condicion/>

Widman International SRL. (s. f.). *La Norma DIN 51519*. Widman. widman.biz/Seleccion/din_51519.html

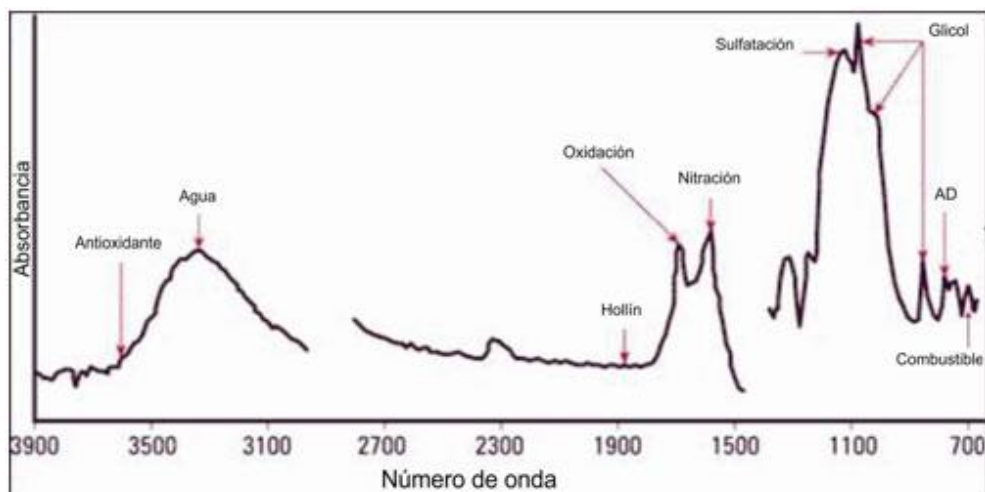
Wolfram. (2022). *Función de densidad de probabilidad para Producto/Cociente de variables aleatorias*. Wolfram. <https://www.wolfram.com/language/11/extended-probability-and-statistics/pdf-for-product-quotients-of-random-variables.html.es>

Wolfram. (s. f.). *Wolfram Language*. Wolfram. <https://www.wolfram.com/language/index.html.es?footer=lang>

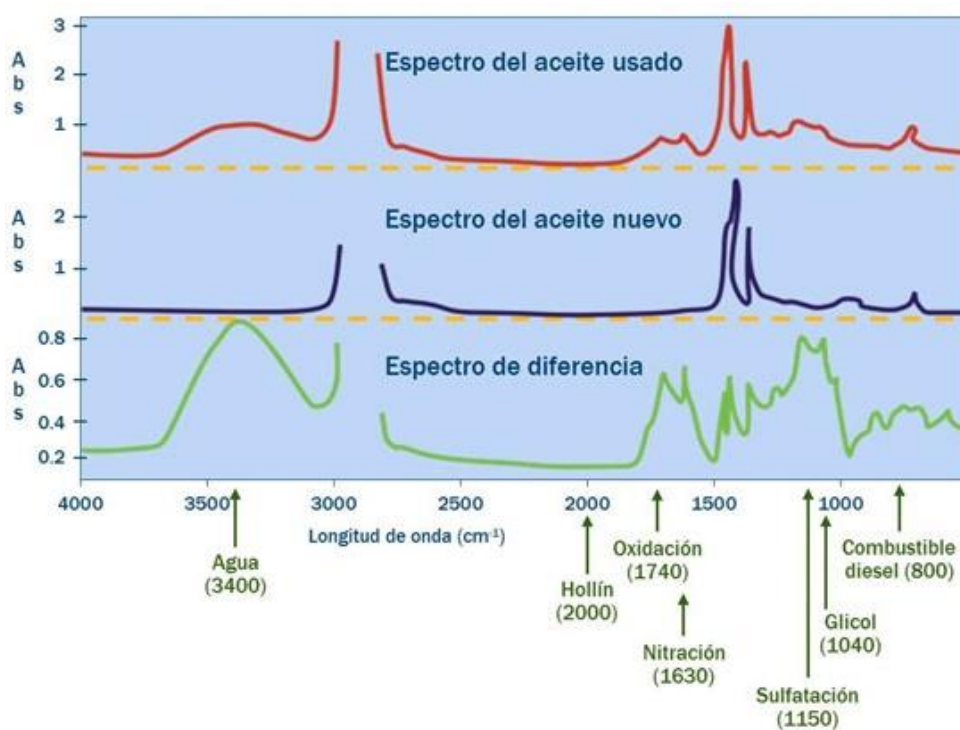
Zeas, Á. (2017). *Implementación de la metodología RCM*. Dspace.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14200>

ANEXOS

Anexo 1. Espectrometría infrarroja por transformadas de Fourier



Fuente: Noria Corporation (2014).



Fuente: Noria Corporation (2014).

Anexo 2. Información cojinetes Zollern

BEARING DIVISION

Zollern white metal for plain bearings type Z

Composition and identifying characteristics

nomination	composition				crushing yield point $\sigma_{d\ 0,2}$ [N/mm ²] at °C			identifying characteristics				
	alloy		admissible					Brinell hardness HB 250/180 at °C			expansion coefficient between 20-100 °C 10-6K-1	
	components weight fraction %		impurity weight fraction %		20	50	100	20	50	100	23,9	7,3
Zollern Z-BHW 38/2	Sn	rest	Fe	<0,01	47	44	27	22	17	11		
	Sb	7,5	Zn	<0,005				melting range 233-360 °C				
	Cu	3,5	Al	<0,005				casting range 400-460 °C				
	Pb	-	Bi	<0,01								
	others	<0,8										

Cd, As and Ni each <0,1weight—%

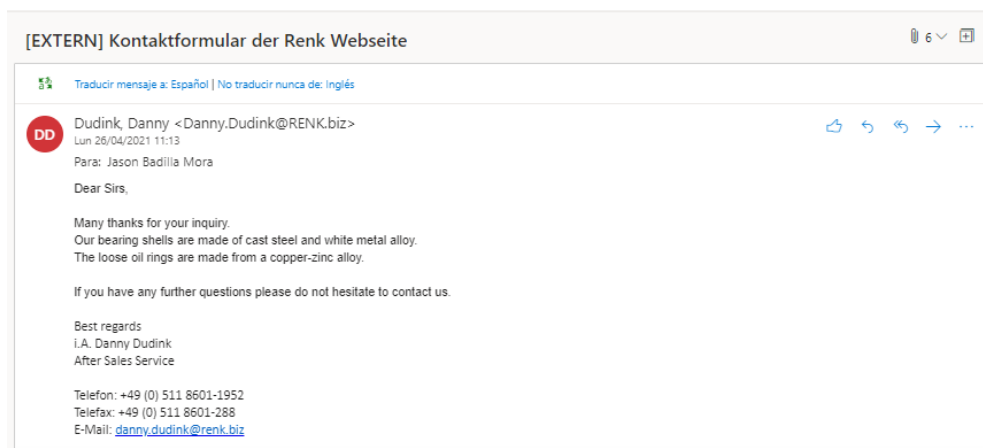
Remarks:

1. Minimum required Brinell hardness is 5 for safe bearing operation. Brinell hardness at 130 °C is 7, i.e. still sufficient.
- 2 Max. admissible bearing temperature that we allow for self contained, natural cooled bearings is 120 °C measured with a PT100 thermometer on the loaded side of the bearing shell in the drillings provided in the bearing shell.
3. Recommended alarm setting 110 °C and trip setting 115-120 °C for an ambient temperature of 50 °C.

Osterode am Harz, 11th November 11/oha567

	Zollern BHW Gleitlager GMBH y CO. KG Plain Bearing Technologie	Rolandsweg 16 - 20 D - 37520 Osterode am Harz Telefon +49.5522.3127-0 Telefax +49.5522.3127-99
---	--	---

Anexo 3. Información cojinetes Renk



Fuente: Dudink (2021).

Anexo 4. Funciones de confiabilidad para modelo predictivo¹

$F(t)$ es la función de distribución acumulada (CDF). Es el área bajo la curva $f(t)$ de 0 a t (alguna veces llamada la no confiabilidad o probabilidad de falla acumulada).

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx$$

Ecuación 2

La probabilidad de que un componente sobreviva/funcione más allá de un instante t , está determinada por la función de supervivencia, que en el ámbito de la confiabilidad recibe el nombre de función de confiabilidad (Reliability Function):

$$R(t) = \Pr(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(x) dx = 1 - F(t)$$

Ecuación 3

$R(t)$ es una función continua, monótonamente decreciente y tal que:

$$\begin{aligned} R(0) &= 1 \\ R(\infty) &= \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 4

Estos resultados indican que la confiabilidad en el tiempo $t=0$ es igual a 1 y la confiabilidad cuando el tiempo tiende a infinito es cero.

La función de confiabilidad proporciona la probabilidad de que un componente, equipo o sistema funcione al cabo de t horas. Por lo anterior, si un componente tiene una función de confiabilidad:

$$R(760) = 0.95$$

Ecuación 5

Quiere decir que la probabilidad de que el componente siga funcionando al cabo de 760 h es de 95 %.

Esta es la probabilidad de funcionamiento libre de falla, o sea, que sobrevivan sin falla transcurrido el mismo tiempo t . Representado por el área bajo la curva t hasta infinito $R(t) = 1 - F(t)$.

¹ Martinez, A. F. (s.f.). *Introducción a los Modelos Probabilísticos de la Función de Confiabilidad ($R(t)$)*. Obtenido de Predictiva 21: <https://predictiva21.com/modelos-probabilisticos-funcion-confiabilidad/>

Anexo 5. Informe técnico de falla en acople, eje y cojinete



Análisis de condición de componentes y causa raíz de fallo en CH2 U2

Subgerencia de Producción de Energía/ Gestión Técnica

Ing. Esteban Cedeño
Alfaro

Informe Causas de fallo
03/08/2017



Antecedentes

La unidad #2 de la Central Hidroeléctrica Chocosuela 2 (CH2 U2), estuvo sometida a esfuerzos de torsión inadecuados por una condición de desalineación que se presentó por un indebido montaje electromecánico durante la puesta en marcha, donde las placas de cimentación no conservaron una superficie paralela a las bases de cimentación de los cojinetes de la turbina (Empuje y guía de eje de turbina), esto inclusive ocasiono un desgaste acelerado del acople flexible que obligo a su sustitución en 2010, seguidamente la unidad fue sometida a un proceso de alineación de ejes en el año 2016 donde se corrige la desalineación de máquina y se registra una estabilidad de vibraciones y temperaturas posterior al proceso de alineación.

Esta unidad está incluida dentro de un plan de mantenimiento predictivo por lo que cuenta con un registro histórico de vibraciones, que va desde el 2008 y hasta el 11 de julio del 2017. Los datos históricos no reflejan un

indicio de fallo correspondiente al evento sucedido.

Alcance

Se pretende analizar posibles causas de fallo a partir del análisis de distintos elementos mecánicos que conforman el conjunto turbogenerador, incluyendo las partes involucradas como los cojinetes, registro dimensional de turbina, acople flexible, verificación de alineación de eje, y posición de estator de generador. Adicionalmente se analiza la secuencia de falla registrada en bitácora y datos registrados por el SCADA, todo esto enfocado a sintetizar una hipótesis con bases registrales del evento.

Resumen

Desde el momento de la falla correspondiente al 29 de Julio del año 2017, se inicia con una serie de revisiones de los componentes mecánicos que conforman el grupo turbogenerador de la unidad 2 de Chocosuela II. Se inició por la revisión de los demás

cojinetes, encontrando un estado satisfactorio, con la excepción del cojinete involucrado en el fallo; todos se encuentran en excelentes condiciones para operar.

Seguidamente se revisan las holguras de la turbina para confirmar si eventualmente se generó un desgaste acelerado en las zonas de medición, sin embargo los resultados obtenidos son muy similares a los valores resultantes del último mantenimiento mayor en el 2015.

También, se realiza una verificación de alineación para confirmar el correcto ajuste de los ejes, confirmando un estado óptimo.

Y así sucesivamente, por lo que la causa se asocia con un evento transitorio de la turbina por una ruptura de una de las bieletas del distribuidor, la cual genera una serie de fuerzas que termina por llevar a una falla súbita del acople flexible, el cual, al igual que el cojinete dañado es el que manifiesta mayor severidad de consecuencias del evento de falla.

Análisis de condición de componentes y causa raíz de fallo

El evento resultante de fallo se manifestó de manera súbita, por lo que se analizan distintos componentes que pudiesen estar involucrados, entre ellos la condición de holguras en la turbina, los cojinetes, posición de estator con respecto a rotor.

Resultados de inspección de turbina.

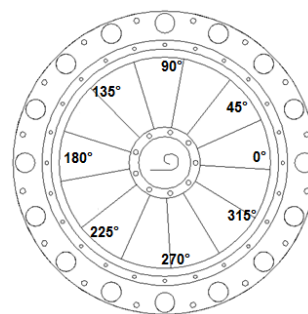


Figura No.1: Ilustración de rodete/laberintos

Holguras de espalda de turbina:

° de referencia	Mante (mm)	Actual (mm)
45°	0.51	0.50
135°	0.62	0.63
225°	0.58	0.55
315°	0.40	0.40

Holguras lado descarga:

° de referencia	Mante (mm)	Actual (mm)
0°	0.49	0.45
45°	0.46	0.38
90°	0.49	0.47
135°	0.45	0.47
180°	0.72	0.75
225°	0.74	0.75
270°	0.64	0.62
315°	0.60	0.54

Tal y como se aprecia en las tablas, las mediciones no presentan mayor variación entre los registros del último mantenimiento mayor (año, 2015), donde no existen diferencias ni de 0.1 mm, lo cual comprueba la constancia de las partes medidas, y se descarta un empuje hidráulico, descartando que la falla sea asociada a desgastes en la turbina. Se realiza una sustitución de la bieleta dañada durante el evento.

Acople

Es uno de los elementos que mayor impacto sufrió en el evento de fallo, apreciándose una serie de estrías en los laterales de los dientes bulonados, confirmando una falla de este, y además de un desplazamiento bastante marcado del eje, de más de un centímetro hacia el lado del generador.

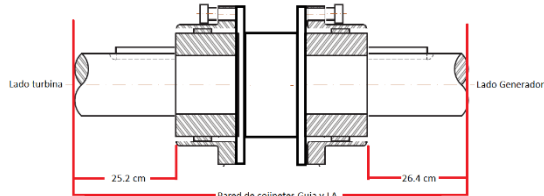


Figura No.2: Verificación de posicionamiento de acople

Cojinetes

El único cojinete que resultó dañado después del evento fue el cojinete LA destruyendo el babbitt axial y parte del radial en la zona de impacto. A continuación se presenta la comparación entre situación actual en comparación con el registro dimensional del último mantenimiento, evidenciando concretamente que conserva la integridad total de los otros tres cojinetes.

Cojinete de empuje

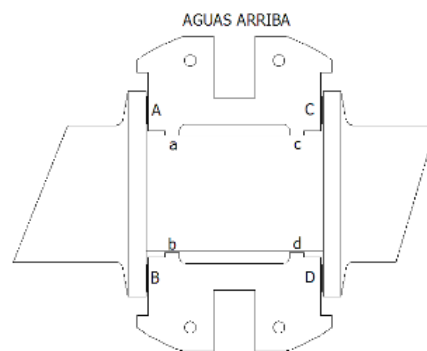


Figura No.3: Holguras Eje/cojinete empuje

Mante (mm)		Actual (mm)	
A	0.10	A	0
B	0.10	B	0
C	0.80	C	0.35
D	0.78	D	0.35
a	0.76	a	0.10
b	0.076	b	0.05
c	0.10	c	0.076
d	0.051	d	0.05

Cojinete Guía de Turbina

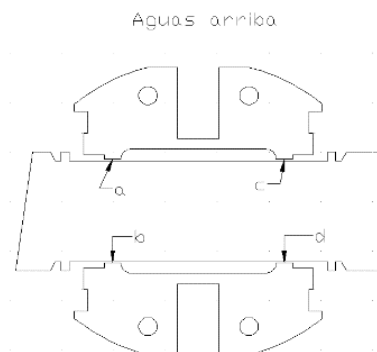


Figura No.4: Holguras Eje/cojinete guía

Mante (mm)		Actual (mm)	
a	0.102	a	0.10
b	0.76	b	0.054
c	0.102	c	0.10
d	0.102	d	0.051

Cojinete LA Generador (Falla)

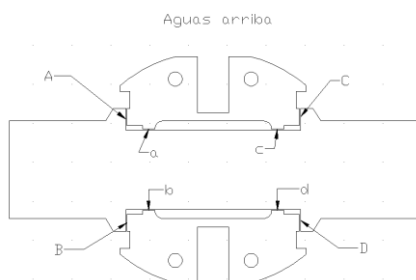


Figura No.5: Holguras Eje/cojinete LA

Mante (mm)		Actual (mm)	
A	0.60	A	3.55
B	0.60	B	3.50
C	0	C	0
D	0	D	0
a	0.07	a	0.076
b	0.07	b	0.05
c	0.07	c	0
d	0.05	d	0

Cojinete LOA Generador

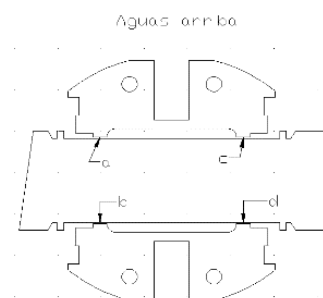


Figura No.6: Holguras Eje/cojinete LOA

Medición	Mante (mm)	Actual (mm)
a	0.102	0.076
b	0.102	0.10
c	0.102	0.10
d	0.076	0.076

Pines Guía

Se realiza una inspección de los pines guías del estator del generador, para comprobar un posible desplazamiento del mismo, lo cual pudiese ser una causa del desplazamiento del eje, sin embargo, al retirar los mismos salen sin mayor esfuerzo, y entran con normalidad, por lo que se descarta cualquier tipo de desplazamiento del estator del generador.

Análisis de bitácora y registro de SCADA

En esta parte del informe se detallan los datos que fueron recolectados por el SCADA durante el momento de falla, dejando como resultado lo que se puede apreciar en las siguientes imágenes:

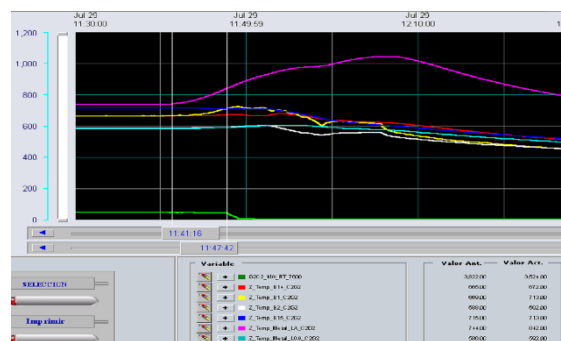


Figura No.7: Gráfico registro temperatura de cojinetes según SCADA

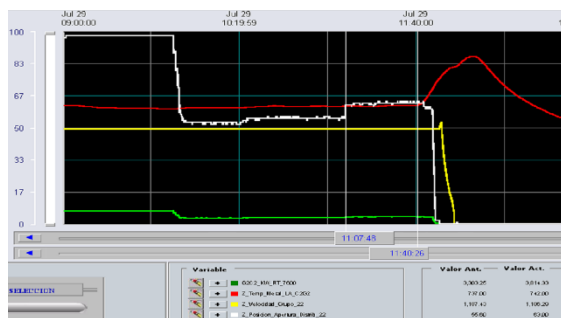


Figura n.º 8: Gráfico temperatura de cojinete LA, apertura de distribución y consigna de potencia de máquina.

Tal y como se puede apreciar, se presenta un fallo súbito donde la temperatura se incrementa rápidamente con un diferencial de tiempo de apenas 5 minutos, imposibilitando el accionar del operador para dar respuesta al fallo esto en relación a la primera imagen. Por otro lado en la segunda imagen vemos únicamente el incremento de la temperatura en el cojinete "LA", el cual fue el que sufrió la mayor afectación (línea roja), y además de una variación irregular en el porcentaje de apertura del distribuidor de la turbina (línea blanca), el cual tuvo que haberse mantenido constante, con respecto a la potencia asignada durante la manifestación del evento, situaciones que sucedieron después de la ruptura de la bieleta de turbina.

Verificación de alineación

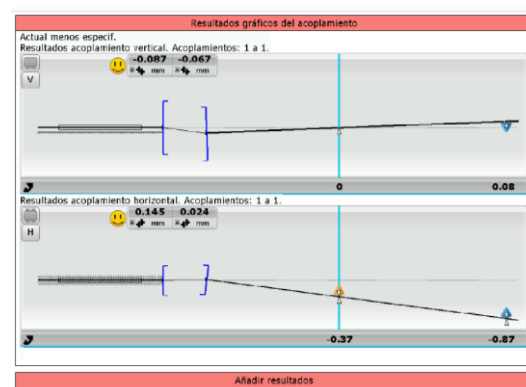


Figura No.9: Verificación de alineación de ejes

La verificación de alineación arroja un valor de alineación satisfactorio tanto para la perpendicularidad vertical como también para la horizontal, por lo que se descarta que el fallo pudiese ser causado por una desalineación de ejes.

Formulación de hipótesis según información recolectada

Transitorio hidráulico por fractura de bieleta de distribuidor.

Como se aprecia en los gráficos de SCADA en la consigna de potencia la maquina registra una operación inicial de 7 MW y luego una disminución a 3 MW, seguidamente una nueva variación inmediata a 3,7 MW que es la potencia en la que se prevé se dio la ruptura de una “*bieleta*” por el cambio abrupto de potencia, según variaciones reflejadas en la regulación de velocidad mediante apertura de distribuidor.

Seguidamente y durante el evento de falla y una vez que la velocidad de la turbina disminuye, el operador de turno manifiesta que se escucha un ruido similar al de las hélices de un helicóptero, por lo que se inspecciona la turbina y se encuentra efectivamente una “*bieleta*” del distribuidor quebrada.

Cuando esto ocurre el alabe que está conectado a esta “*bieleta*”, inmediatamente queda inoperable para el distribuidor lo que complica la regulación de velocidad de la máquina, ingresando un caudal que no puede

ser controlado y sumado a esto el agua ingresa únicamente por un segmento desde el distribuidor lo cual crea desbalance hidráulico en el rodete, ya que el distribuidor intenta cerrar los otros alabes para mantener potencia y velocidad, hasta que la válvula guardia cierre por completo el flujo de agua que ingresa al espiral de turbina.

Este efecto transitorio crea además una variación constante en el par torsional que se transmite el eje de la turbina hacia eje del generador a través del acople flexible, lo cual pudo crear un desplazamiento en el acople flexible incapaz de volver a su posición inicial después de las fuerzas generadas por este efecto transitorio, generando una mayor apertura entre los dientes bulonados del acople, provocando una falla súbita al impactar el eje del generador contra el cojinete dañado.

Para explicar mejor esta causa de fallo se deriva el siguiente análisis mecánico:

Formula de par de torsión:

$$\tau = \frac{60 * P}{2\pi * RPM}$$

Viendo la formula anterior decimos entonces que el par mecánico está sujeto y es directamente proporcional a 2 variables que serían: la potencia y la velocidad de la máquina, como en nuestro caso es un

generador síncrono nuestra velocidad no cambia, pero si lo hace la potencia, la cual sería la condición que afecte nuestro par de torsión, por ejemplo:

Para 7 MW:

$$\tau = \frac{60 \cdot 70000 \text{ W}}{2\pi \cdot 1200 \text{ RPM}} = 557 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para 3 MW:

$$\tau = \frac{60 \cdot 30000 \text{ W}}{2\pi \cdot 1200 \text{ RPM}} = 238.73 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Como la potencia también está directamente relacionada al caudal de ingreso de la turbina y su diferencial de caída neta, se puede asumir entonces que al tener un caudal que es difícil de controlar por la ruptura de la “*bieleta*”, entonces se va manifestar una variación de potencia constante y por ende al mismo tiempo una variación en el par de torsión, generando así una fallo súbito sobre el acople flexible, debido a una variación constante en el par que transmite el eje de la turbina hacia el eje del generador.

Incorporación de partículas ferrosas a grasa de acople o cojinete LA.

Como se aprecia en el control dimensional de la máquina, las holguras de la turbina, cojinetes, posición del estator y verificación de alineación, así como la inspección visual de los elementos bajo análisis, se manifiestan condiciones prácticamente iguales a los

registros del último mantenimiento mayor lo cual descarta que el evento pudiese haber sido ocasionado por desgaste en alguno de los elementos anteriormente citados. Por lo que se asume que el fallo pudo haber sido provocado por la incorporación de partículas ferrosas abrasivas de 2 posibles maneras:

Ingreso de partículas ferrosas a través de grasa de acople:

Cuando se aplica mantenimiento sobre el acople flexible, se tiene un procedimiento de fabricante para ejecutar cada 3 000 horas y cada 8 000 horas, las actividades varían, sin embargo a las 8 000 horas evaluamos la condición de la grasa, y esta se sustituye por grasa nueva, durante estos procedimientos se tienen importantes controles de limpieza, ya que una partícula ferrosa puede crear abrasión sobre todo el dentado que transmite el par de torsión, sin embargo esto no omite la posibilidad de que durante la operación normal de la unidad turbogeneradora el mismo par de torsión genere esfuerzos que ocasionen desprendimiento de pequeñas partículas del dentado que conforma el acople flexible. Situación que podría ser causa detonante de las estrías encontrar en el acople flexible, llevando esto a una falla súbita del

mismo al ser incapaz de transmitir potencia adecuadamente.

Ingreso de partículas ferrosas a través del sistema de lubricación al cojinete LA:

Analizando puntualmente el sistema de lubricación está directamente interactuando con mecanismos de roce constante, los cuales pueden ocasionar el desprendimiento de partículas, por ejemplo los engranajes de la bomba mecánica de lubricación, los cuales pueden enviar alguna partícula ferrosa directamente a crear un rozamiento entre la guía axial del eje con respecto al cojinete LA, generando una falla abrasiva y de arrastre sobre toda la circunferencia del cojinete, incrementado así la temperatura de fallo del cojinete y ocasionando así los resultados del evento ocurrido.

Conclusiones

- Todas las verificaciones dimensionales realizadas, muestran que no existen diferencias sustanciales que evidencien que el fallo se debe a un desgaste pronunciado en ningún elemento del grupo turbogenerador.
- Los elementos que mayor impacto sufrieron a raíz del incidente resultaron ser, el eje, cojinete LA y acople flexible.
- La verificación de alineación manifiesta un excelente estado con respecto a su anterior alineación de ejes, mostrando una excelente

angularidad y paralelismo entre el eje de turbina y generador.

- A raíz del evento sucedido la hipótesis de un desbalance hidráulico es la que mejor se ajusta a las consecuencias apreciadas en los elementos dañados, producto de la bieleta que se encontró quebrada después que se realizara una inspección completa sobre todo el grupo turbogenerador.
- De acuerdo con el plan de mantenimiento y a los resultados de este, la unidad se encontraba en buenas condiciones operativas y sin indicios de falla.

Recomendaciones

- Se recomienda incluir en el plan de mantenimiento preventivo (MP9), una actividad de toma de muestra de grasa del acople flexible, para cuantificar la cantidad de partículas ferrosas que pueda desprender el acople flexible bajo condiciones de operación normal.
- Debido a la condición del eje, es necesario que sea sometido a un proceso de rectificación en la cara de la guía axial, correspondiente al cojinete LA, revisando que las tolerancias sean acordes con un ajuste H7 para este tipo de aplicación, repuntando como máximo una tolerancia 0.3 mm por lado.
- Llevar registro de presión de espalda por parte de los operadores de casa máquinas, (incluir en todas las centrales de generación).
- Sustituir el cojinete dañado por uno de los que se encuentra en *stock* y verificar las dimensiones del cojinete para que se realice un adecuado ajuste H7, con respecto al eje.
- Sustitución del acople flexible de esta unidad ya que el mismo resultó bastante dañado después del incidente de fallo, verificando que las dimensiones de este sean compatibles con el que se encuentra en bodega.

Anexo 6. Tiempos de fallas

REGISTRO DE EVENTOS PARA LA UNIDAD N.º 2							
Hora	Duración	Estado	EA	Evento	Observación	Sistema	Componente
00:00	7.03	TOPRSFPG	X		RECUPERAR NIVEL		
07:02	1.00	HINDPUG		Evento o avería propia	Presión aceite del sistema	Turbina_AZ2	Central de regulación
08:02	11.85	HDUG		Producción			
19:53	4.59	HINDPUG		Evento o avería propia	Falla de bombas central hidráulica de pilotaje	Turbina_AZ2	Central de regulación
00:28	23.53	HDUG		Producción			
00:00	0.00						

REGISTRO DE EVENTOS PARA LA UNIDAD N°2							
Hora	Duración	Estado	EA	Evento	Observación	Sistema	Componente
00:00	6.72	HDUG	X		EN LINEA		
06:43	0.28	HINDIFUG		Falla en la red de CC	FALLA RED		
07:00	1.75	HINDPFUG		Mantenimiento de en	calentamiento en coj	Generador_AZ2	Cojinetes
08:45	0.07	HDUG			EN LINEA		
08:49	15.18	HINDPFUG		Evento o avería prop	Falla bomba macáni	Generador_AZ2	Cojinetes
00:00	0.00						

REGISTRO DE EVENTOS PARA LA UNIDAD N°2							
Hora	Duración	Estado	EA	Evento	Observación	Sistema	Componente
00:00	14.07	HDUG	X		EN LINEA		
14:04	1.55	HINDPFUG		Evento o avería pr	temperatura de cojin	Generador_AZ2	Cojinetes
15:37	1.43	HDUG			EN LINEA		
17:03	1.88	HINDPFUG		Evento o avería pr	falla en el mipreg	Turbina_AZ2	OTRO
18:56	5.07	HDUG			EN LINEA		
00:00	0.00						

Sistema	Componente	Horas	Detalle
Generador	Cojinete	0.08	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.1	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	1.1	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.58	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.07	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	1	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	6.75	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	11.42	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.9	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.18	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.42	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.88	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	1.55	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	1.37	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	0.25	Temperatura cojinete
Generador	Lubricación	0.4	Suciedad en la cuba
Generador	Lubricación	0.35	Suciedad en la cuba
Generador	Lubricación	0.4	Suciedad en la cuba
Generador	Lubricación	0.55	Suciedad en la cuba
Generador	Cojinete	0.15	Temperatura cojinete
Generador	Cojinete	1.75	Calentamiento-desarme
Generador	Cojinete	0.17	Temperatura cojinete
Generador	Lubricación	0.35	Temperatura aceite
Generador	Lubricación	0.3	Temperatura aceite
Generador	Lubricación	0.4	Temperatura aceite
Generador	Lubricación	0.4	Temperatura aceite
Generador	Lubricación	0.3	Presión
Generador	Lubricación	0.3	Presión
Generador	Lubricación	0.2	Presión
Generador	Lubricación	0.17	Nivel de aceite bajo
Generador	Lubricación	1.58	Fuga - reparación
Generador	Lubricación	0.4	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.3	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.35	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.55	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.37	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.52	Falla de bomba
Generador	Lubricación	0.25	Falla Bomba mecanica
Generador	Lubricación	4.5	Falla Bomba mecanica
Generador	Lubricación	15.18	Falla Bomba mecanica
Generador	Lubricación	16.45	Falla Bomba mecanica
Generador	Lubricación	0.88	Falla Bomba - cambio
Generador	Lubricación	0.68	Falla bomba - acople
Generador	Lubricación	1	Falla Bomba
Generador	Lubricación	6	Bomba mecánica - cambio
Generador	Lubricación	2.33	Falla Bomba
Generador	Lubricación	0.43	Falla Bomba
Generador	Lubricación	0.3	Falla Bomba
Generador	Lubricación	0.48	Falla Bomba
Generador	Lubricación	1.07	Nivel de aceite bajo
Intercambiador	Filtración	0.55	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.7	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.55	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.65	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.5	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.4	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.7	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.4	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.75	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.6	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.45	Filtro obstruido
Intercambiador	Filtración	0.75	Filtro obstruido
Intercambiador	Lubricación	0.17	Obstrucción agua que enfria
Intercambiador	Lubricación	0.25	Obstrucción agua que enfria
Turbina	Regulación	0.18	Suciedad en la cuba
Turbina	Regulación	0.22	Suciedad en la cuba
Turbina	Regulación	0.57	Falla de bomba
Turbina	Regulación	0.3	Presión
Turbina	Regulación	1	Presión
Turbina	Regulación	4.12	Falla de bomba
Turbina	Regulación	0.7	Falla de bomba
Turbina	Regulación	0.44	Falla de bomba
Turbina	Regulación	0.47	Falla de bomba
Turbina	Regulación	0.75	Presión
Turbina	Regulación	3.25	Piston regulación
Suma		105.88	
Promedio		1.41173333	
Cantida total		75	

BITACORA DE MANTENIMIENTO		
Empresa Encargada:	COOPELESCA R.L	
Central Hidroeléctrica:	CH Doña Julia	
DATOS DEL TÉCNICO ENCARGADO		
Nombre:		Telefono:
No. Identificación:		Firma:
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO		
EQUIPO	MARCA/MODELO	DESCRIPCIÓN DETALLADA
Cental de regulación G2	HIDRAVICK	Equipo encargado de almacenar el aceite para el sistema de regulación, además de su transmisión de fuerza
Mantenimiento		
Hora inicio	Hora final	Descripción de actividades
7:30am	08:07am	Preparación de recipientes y equipo necesario para la limpieza y chequeo
8:07am	8:10am	Se detiene por esmerilado en otra tarea, esto debido a una mala comunicación
8:10am	9:00am	Inicia el drenado del aceite con la filtradora, hacia los recipientes
9:00am	9:30am	Paro por desayuno
9:30am	11:13am	Limpieza y extracción de los lodos de la cuba
11:13am	11:58am	Checkeo de filtros y traspaso del aceite desde los recipientes hacia la cuba, nuevamente utilizando la filtradora

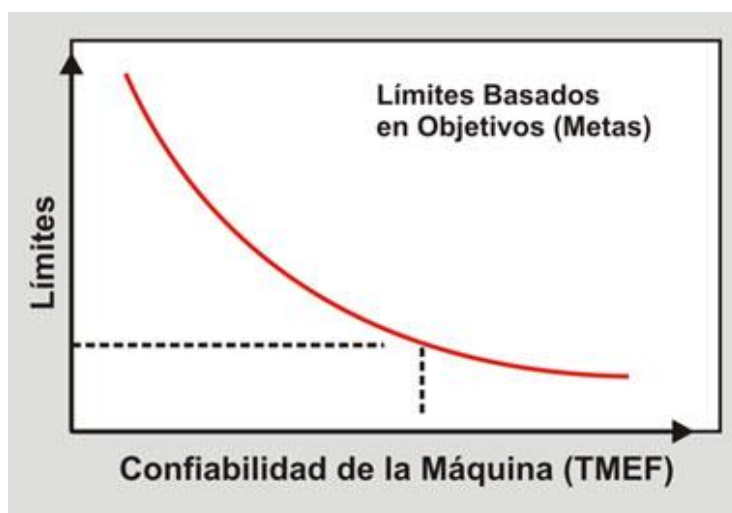
Anexo 7. Límites base

Con base en objetivos. Este tipo de límite se aplica comúnmente a conteo de partículas, nivel de humedad, contaminación con glicol, dilución por combustible, AN y otras condiciones comunes de causa raíz de falla.

Límites basados en metas (superiores)			Límites de envejecimiento		
	Precaución	Crítico		Precaución	Crítico
Limpieza	16/14/11	17/16/13	Viscosidad	+ 5%	+10%
Humedad	200	600	RPVOT	-30%	-60%
AN	0.2	0.4	FTIR-Ox	0.3	1.0
Combustible	1.5%	5%	Zinc	-15%	-30%
Glicol	200 ppm	400 ppm	Calcio	-10%	-20%
Hollín	2%	5%	BN	-50%	-75%

Fuente: Fitch (2013).

Aplicado al conteo de partículas un nivel de limpieza que se basa en esta meta adecuada según el tipo de trabajo y el equipo puede extender hasta 3 veces la vida útil.



Fuente: Fitch (2013).

-Guía rápida:

Guía Rápida para el Establecimiento de Límites y Objetivos del Análisis de Aceite

Propiedad a evaluar	Método y Enfoque	Precaución	Límite
Conteo de partículas	TOL ⁽¹⁾ , TEV-P ⁽²⁾ , Especific. del Fabricante	Objetivo	2 Rangos ISO arriba del objetivo
Viscosidad 40°C	Desviación de la línea de base, %	± 5% industrial + 10% Aceites de motor - 5% Aceites de motor	± 10% industrial + 20% - 10%) Motor
100°C		+ 8% Aceites de motor - 4% Aceites de motor	+ 15% - 8%) Motor
AN	Desviación línea de base y/o tendencia	0.2 arriba del punto de inflexión o del aceite nuevo	1 arriba de la línea de base
BN	Disminución de línea base	-50%	BN ≤ 2
Punto de Inflamación	Disminución línea base °C	-20°C	-40°C
Dilución por combustible por Cromatografía de gases o FTIR	Disminución línea base %	1.5%	5%
RPVOT	Disminución línea base %	-50%	-80%
Humedad: Prueba de Crepitación Karl Fischer, etc.	TEV-M ⁽³⁾ , TOH ⁽⁴⁾ , TBCSP ⁽⁵⁾ , recomendaciones del fabricante del equipo	Burbujas de vapor pequeñas - industrial Burbujas de vapor grandes - motor Objetivo	Crepitación audible - industrial Crepitación audible - motor 100% arriba del objetivo
Glicol	Objetivo	+ 200 ppm	+ 400 ppm
Análisis de Elementos Metales de desgaste	Tasa de cambio, métodos estadísticos, especificaciones del fabricante	+1 Desviación Estándar	+2 Desviación Estándar
Contaminantes, ej. K, NA, B, Si	Nivel objetivo basado en concentración	Objetivo	100% arriba del objetivo
Aditivos, ej., P, Zn, Mg, Ca, Ba, Mo	Disminución línea base, %	-10%	-25%
Demulsibilidad	Depende de la prueba y del lubricante	>20 minutos para 40/40/0 (turbinas)	>40 minutos para 40/40/0 separación incompleta (turbinas)
FTIR Oxidación, Nitración, Sulfatación	Porcentaje de absorbancia	+25% con respecto al aceite de referencia	+75% con respecto al aceite de referencia
Aditivos, ZDDP, inhibidores fenólicos	Deterioro del aceite base	-25% con respecto al aceite de referencia	-75% con respecto al aceite de referencia
Agua	Depende de la clasificación API	Objetivo	100% arriba de objetivo
Hollín		+2%	+5%
Densidad Ferrosa DR, Etc.	Tasa de cambio, Métodos estadísticos	Promedio + 1 Desviación Estándar	Promedio + 2 Desviaciones Estándar
Ferografía Analítica	Cualitativo por excepción	N/A	N/A

1. Tabla de Objetivos de Limpieza
2. Tabla de Extensión de Vida - Partículas
3. Tabla de Extensión de Vida - Humedad
4. Tabla de Objetivos de Humedad
5. Tan bajo como sea posible

Fuente: Fitch (2013).

Test	Caution	Critical
Viscosity -40°C	+/- 10% Change	+/- 15% Change
AN (Above initial value)	R&O: 0.6-0.8 Gear: 1.0-1.5 Hydraulic: 0.8-1.0	+0.8 +1.5 +1.0
FTIR (oxidation)	R&O: 10-15 Abs/cm Gear: 15-20 Abs/cm Hydraulic: 10-15 Abs/cm	15-20 Abs/cm 20-25 Abs/cm 15-20 Abs/cm
Water (Karl Fischer)	500-1000 ppm	+1000 ppm
Flash Point (Under new oil)	-40°F	-80°F

Table 3. Warning and Condemning Limits

Fuente: Thibault (2001).

Equipment Type	Viscosity -40°C	Cleanliness Code	AN (1)	Water (2)
Compressors/Turbines	+/- 10% Change	15/13	0.25	1000 ppm
Pumps/Hydraulics	+/- 10% Change	16/13	0.50	1000 ppm
Gearboxes	+/- 15% Change	17/14	1.0	1000 ppm

(1) Some geared turbines require ashless anti-wear package.

(2) Gear oils may contain small amounts of dispersant.

Table 4. Warning Limits

Fuente: Thibault (2001).

PQ vs. AES

ICP (ppm)	PQI	Interferencias	Tendencia del desgaste
Bajo	Bajo	Pocas partículas de desgaste	Tendencia de desgaste normal
Alto	Bajo-Medio	Muchas partículas pequeñas, pocas o ningunas grandes	Desgaste acelerado. Entrada de suciedad (anormal)
Bajo	Alto	Pocas partículas pequeñas y muchas grandes	Fatiga
Alto	Alto	Muchas partículas de todos los tamaños	Desgaste muy serio, posible fallo catastrófico

Fuente: Álvarez (2015).

Límites iniciales probatorios

Propiedad por evaluar	Línea base	Valor preventivo	Valor crítico
Viscosidad @ 100°C	Aceite nuevo	+/-5%	+/-10%
Viscosidad @ 40°C	Aceite nuevo	+/-5%	+/-10%
Número ácido (AN)	Aceite nuevo	Lub: +0.03 del inicial Regu: +0.2 del inicial	Lub: +0.05 del inicial Regu: +1.0 del inicial
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25 % respecto al nuevo	+75 % respecto al nuevo
Aditivos por método atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída del 10 %	Caída del 25 %
Concentración de agua	Aceite nuevo	200 ppm	500 ppm
Conteo de partículas sólidas	Valor objetivo	+1 Código ISO	+2 Código ISO
Contaminantes por método atómico (AES)	0	Subjetivo	Subjetivo
Concentración de metales de desgaste (AES)	0 (Δ ppm/t)	+1Desv	+2Desv

Anexo 8. Hoja de datos del puerto y la manguera

Puerto Tognella FT 290-14:

Findynamica
drive and control products

GAUGE ISOLATOR NEEDLE VALVES IN LINE

The FT290 isolator needle valves (in line) are normally used to protect the pressure gauge since they have the double function of dampening pressure surge during opening and of isolating the pressure gauge entirely. Pressed in high-resistance steel, protected by an accurate treatment, subjected to strict tests, they ensure reliability and long life. A rotating wavel nut allow for accurate pressure gauge orientation. The sealing, standard supplied, and inserted in the nut, prevents any drawing between the connection and the gauge.

For pressure gauge with taper threads, it will be necessary to use copper washers FT 1201 shown on page 182 of this catalogue (to be requested separately). Suitable for pressures up to 400 bar and temperature from -20° to $+100^{\circ}$ they can be panel mounted by use of lock nut (GL) supplied on request.

On request:

- Versions with connections female/female (D1)
- For rigid pipes (D4)
- For flexible pipes (D5)
- Seals in Viton (V)
- Complete with lock nut (GL). Indicate whether KM or hexagonal
- Version in AISI 316 code FT 2290

FT 290

DIMENSIONS

TYPE	A1	A2	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1.4	1/4"	1/4"	12	5,6	20	61,5	4	12	M15x1	53	15	2	9,5	32	2018	16	0,125											
1.3	1/2"	1/2"	16	6,5	32	63	40	12,5	M20x1	62,5	19	5	11	40	2021	27	0,413											

Diámetro interior = 5.6 mm = 0.22pulg

Longitud = 61.5 mm = 2.42pulg

Longitud total de tubería y puerto = 2.42pulg + 1.5pulg = 3.92 in » 4pulg.

Manguera DN 2 PW630/2

Test Hoses SMS / SGS DN 2 + DN 4

Working Pressure up to 630 bar / 9135 PSI



Technical Data for Test Hose



		A	B	C	D
Nominal Bore (DN)	(mm)	DN 2		DN 4	
Max. Working Pressure (PN)	(bar / PSI)	400 / 5801	630 / 9135	340 / 4931	630 / 9135
Min. Burst Pressure	(bar / PSI)	1100 / 15954	1900 / 27557	850 / 12328	1900 / 27557
Testing Pressure	(bar / PSI)	600 / 8702	960 / 13778	570 / 8267	950 / 13779
Pressure Rating in bar / PSI at Indicated Temperature	at 0 °C / 32 °F	488 / 7077	768 / 11138	483 / 6715	768 / 11139
	at 30 °C / 86 °F	440 / 6381	693 / 10051	418 / 6063	693 / 10051
	at 50 °C / 122 °F	400 / 5801	630 / 9137	380 / 5511	630 / 9137
	at 80 °C / 176 °F	344 / 4989	542 / 7861	327 / 4743	542 / 7861
	at 100 °C / 212 °F	308 / 4467	485 / 7034	293 / 4250	485 / 7034
Working Temperature	(°C / °F)	-35 °C ... +100 °C / -31 °F ... +212 °F (momentary +120 °C / +248 °F)			
Inside Diameter	(mm / in)	2 / .08		4 / .16	
Outside Diameter	(mm / in)	57.20		8.6 / .34	
Bending Radius	at working pressure	20 / .79		40 / 1.57	
	at -20 °C / -4 °F	30 / 1.18		60 / 2.36	
Max. Coil Length	(m / ft)	100 / 328			
Weight / m	(kg / lb)	16 / .50		42 / 1.35	
Inner / Outer Tube		PA			
Reinforcement		Synthetic Fibre			
Standard hose end material is Steel 1.1 S Mn Pb 30 (1.0718), zinc/ nickel-plated (Type 15: Steel, black, zinc/ nickel-plated)					
Stainless Steel V2A (1.4305/AISI 303), V4A (1.4571/AISI 316Ti) on request					

Diámetro interno = 0.08 in

Longitud que se utiliza por estándar = 27pulg

Anexo 9. Detalles costos de pruebas para los análisis de aceite

Pruebas básicas predictivos especializados, precio sin costo de envío a USA.

Empresa Coopesca Costa Rica		Vendedor : Cristopher Solano	Cliente : Jason Badilla	
#	Artículo & Descripción	Cant.	Tarifa	Cantidad
1	Análisis de aceite lubricante El paquete de prueba incluye: Número ácido, Análisis de elementos metálicos por ICP, Viscosidad a 40°C o 100°C (determinado por el grado del fluido), agua por plancha, oxidación y nitración, índice de PQ, conteo de partículas por método láser (ISO-4406). No incluye la extracción	1.00	91.00	91.00
2	Flete de envío (según cantidad)	1.00	0.00	0.00
       Protección y monitoreo en línea de vibraciones Analizadores portátiles de vibraciones Analizadores estáticos de bobinados Analizadores estáticos y dinámicos de motores Equipo de medición e instrumentación Ventanas Infrarrojos Cámaras Termográficas				
Subtotal				91.00
IVA (13%)				11.83
Total				\$102.83

Pruebas específicas predictivos especializados.

Empresa Coopesca Costa Rica		Vendedor : Cristopher Solano	Cliente : Jason Badilla	
#	Artículo & Descripción	Cant.	Tarifa	Cantidad
1	Análisis de aceite hidráulico -Acid Number (mod.ASTM D664) -Analytical Ferrography (ASTM D7690) -Elemental Metals Analysis by ICP (Oil) (mod. ASTM D5185) -LSV (Ruler) (ASTM D6971) -Oxidation / Nitration (ASTM E2412) -Particle Count (Calibration: ISO 11171) (ASTM ISO 11500) -Particle Quantifier (Ferrous Density) (Manufacturer)	11.00	730.00	8,030.00
       Protección y monitoreo en línea de vibraciones Analizadores portátiles de vibraciones Analizadores estáticos de bobinados Analizadores estáticos y dinámicos de motores Equipo de medición e instrumentación Ventanas Infrarrojos Cámaras Termográficas				
#	Artículo & Descripción	Cant.	Tarifa	Cantidad
	-RPVOT (ASTM D2272) -Viscosity @ 40C or 100C base on fluid grade (mod. ASTM D445) -Water By Karl Fischer ppm (mod. ASTM D6304C) No incluye la extracción. NOTA: SE REQUIEREN 2.5L PARA CORRER LAS PRUEBAS			

2	Análisis de aceite lubricante	12.00	730.00	8,760.00
	-Acid Number (mod.ASTM D664) -Analytical Ferrography (ASTM D7690) -Elemental Metals Analysis by ICP (Oil) (mod. ASTM D5185) -LSV (Ruler) (ASTM D6971) -Oxidation / Nitration (ASTM E2412) -Particle Count (Calibration: ISO 11171) (ASTM ISO 11500) -Particle Quantifier (Ferrous Density) (Manufacturer) -RPVOT (ASTM D2272) -Viscosity @ 40C or 100C base on fluid grade (mod. ASTM D445) -Water By Karl Fischer ppm (mod. ASTM D6304C)			
	No incluye la extracción			
	NOTA: SE REQUIEREN 2.5L PARA CORRER LAS PRUEBAS			
3	Flete de envío 23 muestras	1.00	650.00	650.00
			Subtotal	17,440.00
			IVA (13%)	2,267.20
			Total	\$19,707.20

Pruebas básicas central de mangueras: metales de desgaste, contaminantes, aditivos, viscosidad, combustible, hollín, TBN, oxidación y nitración.

			
		Sucursales	
Cliente: 3004045117 Ced. Jur.: 3004045117 Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos R.L. Tel. 24012828		COTIZACION N° Documento: PYC-026976	
Lugar de Entrega:		Fecha de creación: 23/11/2021	
Terminos y condiciones:		Fecha de impresión: 23/11/2021	
Forma de Pago: CONTADO Tiempo Entrega: 0 DIAS NATURALES.		Validez de la Oferta: 30 Dias	

Item	Cant# de Parte	Und	Precio	% Desc.	P.Unit Neto	Total
1	1.00 019SV ANALISIS DE ACEITE	SP	₡28,200.00	0 %	₡28,200.00	₡28,200.00

IMPORTANTE: Favor Hacer referencia al No. de Cotizacion en su Orden de Compra Mercadería sujeta a existencias en el momento de facturación	Subtotal:	₡28,200.00
	Descuento Articulos:	₡0.00
	Descuento: %	₡0.00
	Descuento Volumen:	₡0.00
	Impuesto IVA	₡3,866.00
	TOTAL GENERAL:	₡31,866.00

Pruebas específicas predictivos especializados.

COTIZACIÓN

SERVICIO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

APLICACION	DESCRIPCION	PLAZO DE ENTREGA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL -
Análisis de Aceite	- Análisis de aceite de sistema hidráulico paquete standard	- 2 Días Hábiles	1	28,00.- USD	28,00.- USD
01- Análisis de Aceite Hidráulico paquete Standard.					28,00.- USD

INFORMACIÓN DEL PAQUETE DE ANALISIS

Aceite de Sistema Hidráulico	Método ASTM
Viscosidad a 100°C o 40°C (cSt)	D445
Metales de desgaste, Aditivos y Contaminantes ICP -OES (ppm)	D5185
TAN- Numero Acido (mgKOH/g)	D974-D664
Oxidación (Abs/cm)	E2412
Agua (%)	E2412
Conteo de particulado (Código ISO de limpieza)	ISO4406
Indice de PQ (PQI)	D8120
Agua por KF (ppm) - [Solo para compresores y turbinas]	D6304

REGULARIZACIÓN DEL SERVICIO

- Enviar muestras a ALS PATAGONIA S.A. (División Tribology) Hermanos Carrera Pinto 159, Parque Industrial Los Libertadores, Colina. Santiago -Chile
- Forma de Pago: Pre-pago a través de transferencia Bancaria. Depositando a ALS Patagonia S.A. RUT: 96.802.440-K Cta.Cte.:0-000-0653650-6 del Banco Santander. **Previa orden de compra.**
- Logística: **No incluido Kit y envío de la muestra.** (para pedidos de 10 muestras o más se incluye Kit de muestreo y el envío):
[1 KIT= 1 manguera + 1 Formulario + 1 Frasco ALS + 1 Frasco negro anti-derrame]

Anexo 10. Detalles de costos para puertos de muestreo

Instalación de puertos de muestro



COTIZACION

COMPONENTES HIDRAULICOS Y SERVICIOS S. A.
 TELEFONO: 22214740 FAX: 2256-4302
 CEDULA: 3101223760
 DIRECCION: SAN JOSE, ENTRE CALLES 14 Y 16 AVE. 20

Cotizacion #
COT-003858

FECHA: 21-07-2020
 MONEDA: COLONES

CLIENTE: COOPELESCA R.L.
 DIRECCION: COSTADO ESTE DE LA ESCUELA JUAN CHAVES ROJA
 TELEFONO: 24012900
 CONTACTO:
 VENDEDOR: LEONARDO HERNANDEZ
 OBSERVACIONES:

CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO/UNIT	MONTO
COG001	SERVICIO COLOCAC PUNTA PRUEBA BAJA PRESI	15,00	89.770,00	1.346.550,01
COG002	SERVICIO COLOCAC PUNTA PRUEBA ALTA PRESI	13,00	120.850,00	1.571.050,01

Condiciones de Reparación:

Tiempo de Entrega: A CONVENIR
 Forma de Pago: CREDITO
 Validez: 15 DIAS
 Garantía: N/A
 Detalles de Cotización: PRECIO POR PUNTA DE MEDICION

Monto en Letras: TRES MILLONES DOSCIENTOS NOVENTA Y SEIS MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y OCHO CON 00/100
 Realizada por:

ROBERTO MADRIGAL			SUB TOTAL:	¢	2.917.600,00
NOMBRE	FIRMA	CEDULA	DESCUENTO:	¢	0,00
			IMPUESTO:	¢	379.288,00
Aprobada por:			FLETE:	¢	0,00
			TOTAL:	¢	3.296.888,00
NOMBRE	FIRMA	CEDULA			

Anexo 11. Tablas de extensión de vida

Tabla de extensión de vida por limpieza

		Nivel de Limpieza Nuevo - Proactivo (Código ISO)																					
		*/20/17		*/19/16		*/18/15		*/17/14		*/16/13		*/15/12		*/14/11		*/13/10		*/12/9		*/11/8		*/10/7	
Nivel de Limpieza Actual - Pre - Proactivo (Código ISO)	*/26/23	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7.5	>10	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
		4	2.5	4.5	3	6	3.5	6.5	4	7.5	5	8.5	6.5	10	7	>10	9	>10	10	>10	>10	>10	>10
	*/25/22	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	7	>10	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10
		3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	6.5	4	8	5	9	6	10	7.5	>10	9	>10	>10	>10	>10
	*/24/21	3	2	4	2.5	6	3	7	4	9	5	>10	6	>10	7	>10	8	>10	10	>10	>10	>10	>10
		2.5	1.5	3	2	4	2.5	5	3	6.5	4	7.5	5	8.5	6	9.5	7	>10	8	>10	10	>10	>10
	*/23/20	2	1.5	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	6	>10	8	>10	9	>10	>10
		1.7	1.3	2.3	1.5	3	2	3.7	2.5	5	3	6	3.5	7	4	8	5	10	6.5	>10	8.5	>10	10
	*/22/19	1.6	1.3	2	1.6	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	8	4	>10	5	>10	6	>10	7	>10	>10
		1.4	1.1	1.8	1.3	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5.5	3.5	7	4	8	5	10	5.5	>10	8.5
	*/21/18	1.3	1.2	1.5	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	3.5	9	4	>10	5	>10	7	>10	10
		1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.4	2.2	1.6	3	2	3.5	2.5	4.5	3	5	3.5	7	4	9	5.5	10	8
	*/20/17			1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4	9	5	>10	7	>10	9
				1.2	1.05	1.5	1.3	1.8	1.4	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	5	3	6	4	8	5.5	10	7
	*/19/16					1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4	9	6	>10	8
						1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.2	1.7	3	2	3.5	2.5	5	3.5	7	4.5	9	6
	*/18/15							1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	5	3	7	4.5	>10	6
							1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3	2	3.5	2.5	5.5	3.7	8	5	
*/17/14									1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	6	3	8	5	
									1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.7	3	2	4	2.5	6	3.5	
*/16/13											1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	3.5	6	4	
											1.2	1.1	1.5	1.3	1.8	1.5	2.3	1.8	3.7	3	4.5	3.5	
*/15/12													1.3	1.2	1.6	1.5	2	1.7	3	2	4	2.5	
													1.2	1.1	1.5	1.4	1.8	1.5	2.3	1.8	3	2.2	
*/14/11															1.3	1.3	1.6	1.6	2	1.8	3	2	
															1.3	1.2	1.6	1.4	1.9	1.5	2.3	1.8	
*/13/10																	1.4	1.2	1.8	1.5	2.5	1.8	
																	1.2	1.1	1.6	1.3	2	1.6	

Fuente: Noria Corporation (2016).

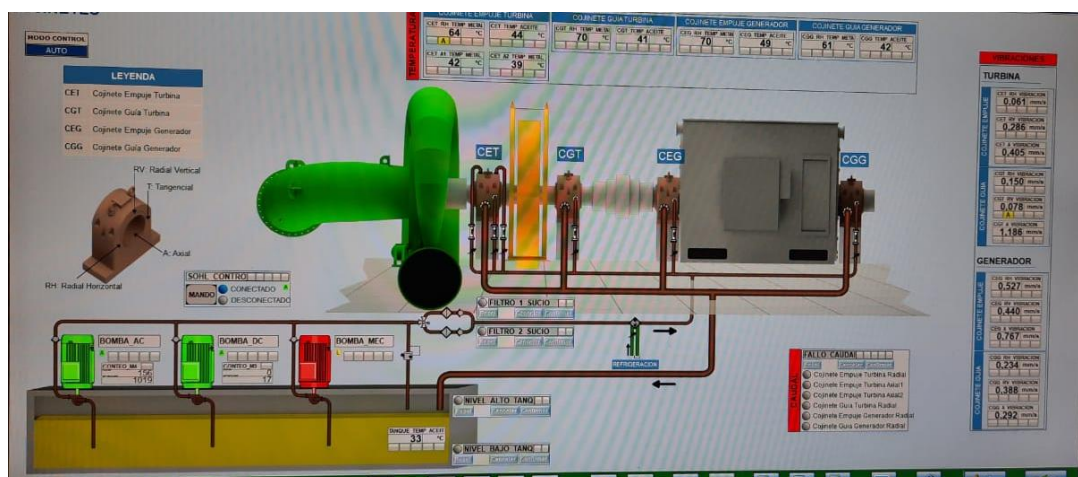
Tabla de extensión de vida por agua

		Nuevo Nivel de Humedad (ppm)															
		10,000		5,000		2,500		1,000		500		250		100		50	
Nivel de Humedad Actual (ppm)		Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes	Roda- mientos	Cojine- tes
	50,000	2.3	1.6	3.3	1.9	4.8	2.3	7.8	2.9	11.2	3.5	16.2	4.3	26.2	5.5	37.8	6.7
	25,000	1.6	1.3	2.3	1.6	3.3	1.9	5.4	2.4	7.8	2.9	11.2	3.5	18.2	4.6	26.2	5.5
	10,000			1.4	1.2	2.0	1.5	3.3	1.9	4.8	2.3	6.9	2.8	11.2	3.5	16.2	4.3
	5,000					1.4	1.2	2.3	1.6	3.3	1.9	4.8	2.3	7.8	2.9	11.2	3.5
	2,500							1.6	1.3	2.3	1.6	3.3	1.9	5.4	2.4	7.8	2.9
	1,000									1.4	1.2	2.0	1.5	3.3	1.9	4.8	2.3
	500											1.4	1.2	2.3	1.6	3.3	1.9
	250													1.5	1.3	2.3	1.6
	100															1.4	1.2

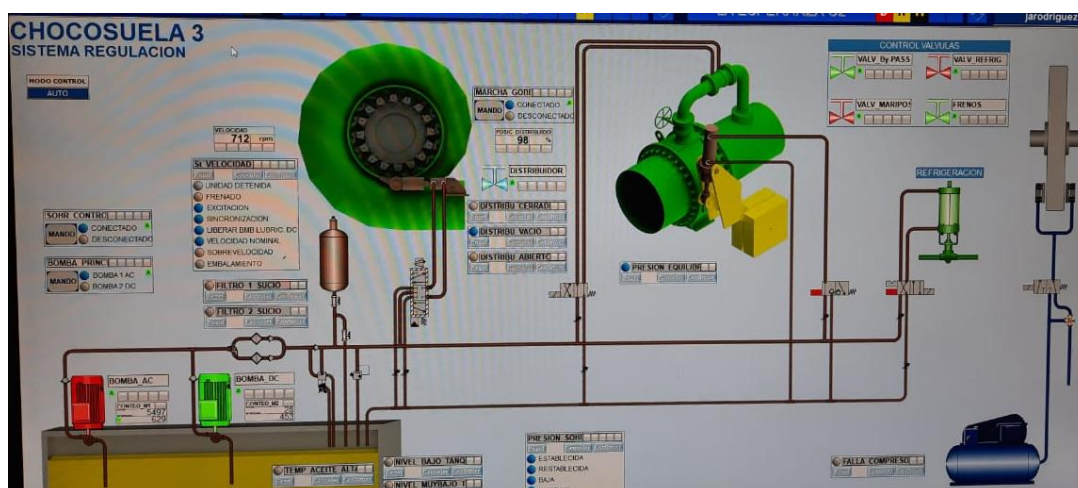
Fuente: Noria Corporation (2018).

Anexo 12. Configuración de las unidades hidráulicas

Unidad de lubricación Scada



Unidad de regulación Scada



Apéndices

Apéndice A. Datos de disponibilidad inicial

Tabla A1. Datos mensuales de la central hidroeléctrica La Esperanza

Datos CH Esperanza Unidad 1				Datos CH Esperanza Unidad 2			
Mes	Confiabilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad	Mes	Confiabilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad
SEP-20	100	98.39	1.61	SEP-20	100	98.69	1.31
OCT-20	95.45	97.37	2.63	OCT-20	96.67	97.49	2.51
NOV-20	100	97.97	2.03	NOV-20	100	97.8	2.2
DIC-20	100	97.54	2.46	DIC-20	100	97.46	2.54
ENE-21	100	98.31	1.69	ENE-21	100	98.54	1.46
FEB-21	100	99.44	0.56	FEB-21	100	99.95	0.05
MAR-21	100	95.24	4.76	MAR-21	100	14.33	85.67
ABR-21	100	97.06	2.94	ABR-21	100	97.13	2.87
MAY-21	100	98.73	1.27	MAY-21	100	98.58	1.42
JUN-21	100	97.87	2.13	JUN-21	100	97.66	2.34
JUL-21	100	98.28	1.72	JUL-21	100	96.79	3.21
SEP-21	100	98.26	1.74	SEP-21	100	98.32	1.68
Total	1195.45	1174.46	25.54	Total	1196.67	1092.74	107.26
Promedio	99.621	97.872	2.128	Promedio	99.723	91.062	8.938

Tabla A2. Datos mensuales de la central hidroeléctrica Aguas Zarcas

Datos CH Aguazarcas 2 Unidad 1				Datos CH Aguazarcas 2 Unidad 2			
Mes	Confiabilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad	Mes	Confiabilidad	Disponibilidad	Indisponibilidad
SEP-20	100	98.22	1.45	SEP-20	100	99.46	0.95
OCT-20	100	97.44	2.56	OCT-20	100	93.85	6.15
NOV-20	100	98.55	1.45	NOV-20	100	99.05	0.95
DIC-20	100	98.86	1.14	DIC-20	100	99.3	0.7
ENE-21	100	99.23	0.77	ENE-21	100	99.14	0.86
FEB-21	100	98.33	1.67	FEB-21	100	98.66	1.34
MAR-21	100	99.96	0.04	MAR-21	100	99.76	0.24
ABR-21	100	14.57	85.43	ABR-21	100	19.21	80.79
MAY-21	100	82.35	17.65	MAY-21	100	96.27	3.73
JUN-21	100	97	3	JUN-21	100	96.21	3.79
JUL-21	100	97.05	2.95	JUL-21	100	98.04	1.96
SEP-21	46	16.04	83.96	SEP-21	100	99.15	0.85
Total	1046	899.38	202.07	Total	1100	998.64	102.31
Promedio	95.09090909	81.762	16.839	Promedio	100	90.785	8.526

Apéndice B. Datos de las centrales hidroeléctricas

Tabla B1. Datos de los sistemas hidráulicos

Hidroeléctrica	Unidad hidráulica	Función	Presión de trabajo	Tipo aceite	Otros	Observaciones
CH La Esperanza (2 Turbogeneradores)	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	100 bar	Hydrex AW 68	2 acumuladores de nitrógeno	
	UH2-Lubricación	1 cojinete de Turbina	3.5 bar	Turboflo XL68	2 acumuladores de nitrógeno	Intercambiador tubos de cobre
	UH3-Lubricación	2 cojinetes del Generador	7 bar	Turboflo R&O 46		Intercambiador tubos de cobre
CH Cubujuquí (2 Turbogeneradores)	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	157 bar	Environ AW 68	1 acumulador de nitrógeno	
	UH2-Inyección	2 cojinetes de Generador Sistema Inyección	170 bar	Turboflo XL 68	2 acumuladores de nitrógeno	Intercambiador tubos de cobre
	UH3-Lubricación	2 cojinetes de Generador	2 bar	Turboflo XL 68		Intercambiador de placas de Inox
CH Platanar	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	69.5 bar	Hydrex AW32		
	UH2-Lubricación	4 cojinetes de Turbina-Generador	5 bar	Turboflo XL46		Intercambiador tubos de cobre
CH Aguaz Zarcas Sitio 1	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	100 bar	Environ AW 32		
	UH2-Lubricación	2 cojinetes de Turbina-Generador	2 bar	Turboflo XL68		Intercambiador tubos de cobre
CH Aguaz Zarcas Sitio 2 (2 Turbogeneradores)	UH1-Regulación y Lubricación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	80 bar	Environ AW 32	2 acumulador 55bar c/u	

		2 cojinetes de Turbina-Generador	5 bar	Turboflo XL68	Cuenta con bomba mecánica	Intercambiador de cobre
CH Chocosuela Sitio 1	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	80 bar	Hydrex AW 68	1 acumulador	
	UH2-Lubricación	2 cojinetes de Turbina-Generador	2.5 bar	Turboflo XL68		Intercambiador tubos de cobre
CH Chocosuela Sitio 2 (2 Turbogeneradores)	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	100 bar	Hydrex AW 68	1 acumulador	
	UH2-Lubricación	4 cojinetes de Turbina-Generador	4.8 bar	Turboflo XL68		Intercambiador tubos de cobre
CH Chocosuela Sitio 3	UH1-Regulación	Control Bypass, Válvula Mariposa y Distribuidor	80 bar	Hydrex AW 68		
	UH2-Lubricación	4 cojinetes de Turbina-Generador	5.5 bar	Turboflo XL68		Intercambiador de placas de Inox

Tabla B2. Datos de los cojinetes del conjunto turbogenerador

Hidroeléctrica	Cojinete	Función	Viscosidad recomendada	Aceite implementado	Cumple	Descripción
La Esperanza 900rpm	Turbina	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EGZLA/K 28-250
	Generador	Empuje	ISO VG46	Turboflo R&O 46		RENK EFZLK 18-180
	Generador	Guía	ISO VG 46	Turboflo R&O 46		RENK EFZLQ 22-225
Cubujuquí 600rpm	Turbina-Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		GTW WGZLA 45-400
	Generador	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		GTW WGZLQ 35-400
Platanar 900rpm	Turbina	Empuje	ISO VG46	Turboflo XL46		LRWLA28/280/1252
	Turbina	Guía	ISO VG46	Turboflo XL46		LRWLO28/280/1254
	Generador	Empuje	ISO VG 46	Turboflo XL46		RENK EFWLK 22-225
	Generador	Guía	ISO VG 46	Turboflo XL46		RENK EFNLQ 22-225
	Turbina-Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo R&O 68		RENK EFXLA 22-200

Aguaz Zarcas Sitio 1 600rpm	Generador	Guía	ISO VG 68	Turboflo R&O 68		LFNLQ 18/180/1365
Aguaz Zarcas Sitio 2 900rpm	Turbina- Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		GF 35 300 FXLA
	Generador	Guía	ISO VG 46	Turboflo XL68		LFZLQ 28-280
Chocosuela Sitio 1 720rpm	Turbina- Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		ZOLLERN ZRZLA 35- 335
	Generador	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		ZOLLERN ZRZLQ 22- 250
Chocosuela Sitio 2 1200rpm	Turbina	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EGXLA 28-280
	Turbina- Volanta	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EGZLQ 22-225
	Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EFZLB 22-250
	Generador	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EFZLQ 18-200
Chocosuela Sitio 3 720rpm	Turbina	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EGXLA 28-280
	Turbina	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EGZLQ 22-225
	Generador	Empuje	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EFZLB 22-250
	Generador	Guía	ISO VG 68	Turboflo XL68		RENK EFZLQ 18-200

Apéndice C. Límites de los aceites

Tabla C1. Aceite Turboflo R&O 46

Prueba	Línea Base	Valor preventivo	Valor crítico
Turboflo R&O46			
Viscosidad @ 100°C	6.7 cSt	6.365/7.035	6.03/7.37
Viscosidad @ 40°C	44.4 cSt	42.18/46.62	39.96/48.84
Índice de viscosidad	104	-	-
Número ácido (AN)	0.12 mg KOH/g	0.15	0.17
Demulsibilidad mecánica	41-39-0 (15min)	41-39-0 (35min)	41-39-0 (55min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Aditivos por método atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +5.000 horas	4.000hrs (-20%)	1.000hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Análisis nuevo	-45% del tiempo	-75% del tiempo
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	16/14/11	18/15/12	19/16/13
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES (Fe)	Evaluar condición vs AES (Fe)
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		

Tabla C2. Aceites Hydrex

Prueba	Línea Base	Valor preventivo	Valor crítico
Hydrex AW 68			
Viscosidad @ 100°C	8.9 cSt	8.45/9.34	8.01/9.79
Viscosidad @ 40°C	67.4 cSt	64.03/70.77	60.66/74.14
Índice de viscosidad	106	-	-
Número ácido (AN)	0.6 mg KOH/g	0.8	1.6
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (10min)	40-40-0 (30min)	40-40-0 (50min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caida -10%	Caida -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caida -10%	Caida -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +6.500 horas	5.200hrs (-20%)	1.300hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Análisis nuevo	-45% del tiempo	-75% del tiempo
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	17/15/12 (Reg)	18/16/13	19/17/14
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES	Evaluar condición vs AES
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico del analista		
Hydrex AW 32			
Viscosidad @ 100°C	5.5 cSt	5.22/5.77	4.95/6.05
Viscosidad @ 40°C	31.5 cSt	29.92/33.07	28.35/34.65
Índice de viscosidad	110	-	-
Número ácido (AN)	0.5 mg KOH/g	0.7	1.5
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (5min)	40-40-0 (25min)	40-40-0 (45min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caida -10%	Caida -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caida -10%	Caida -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +6.500 horas	5.200hrs (-20%)	1.300hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Análisis nuevo	-45% del tiempo	-75% del tiempo
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	17/15/12 (Reg)	18/16/13	19/17/14
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES (Fe)	Evaluar condición vs AES (Fe)
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		

Tabla C3. Aceites Environ

Prueba	Línea Base	Valor preventivo	Valor crítico
Environ AW 68			
Viscosidad @ 100°C	9.1 cSt	8.645/9.93	8.19/10.01
Viscosidad @ 40°C	69.3 cSt	65.83/72.77	62.37/76.23
Índice de viscosidad	106	-	-
Número ácido (AN)	0.11 mg KOH/g	0.31	1.11
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (20min)	40-40-0 (40min)	40-40-0 (60min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +10.000 horas	8.000hrs (-20%)	2.000hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Caída de presión 25.4psi 1.400min	770min (-45%)	350min (-75%)
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	17/15/12 (Reg)	18/16/13	19/17/14
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES	Evaluar condición vs AES
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		
Environ AW 32			
Viscosidad @ 100°C	5.7 cSt	5.415/5.985	5.13/6.27
Viscosidad @ 40°C	31.7 cSt	30.115/33.285	28.53/34.87
Índice de viscosidad	121	-	-
Número ácido (AN)	0.11 mg KOH/g	0.31	1.11
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (10min)	40-40-0 (30min)	40-40-0 (50min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +10.000 horas	8.000hrs (-20%)	2.000hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	Caída de presión 25.4psi 1.909min	1.622min (-45%)	477.25min (-75%)
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	17/15/12 (Reg)	18/16/13	19/17/14
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES (Fe)	Evaluar condición vs AES (Fe)
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		

Tabla C4. Aceites Turboflo XL

Prueba	Línea Base	Valor preventivo	Valor crítico
Turboflo XL68			
Viscosidad @ 100°C	8.8 cSt	8.36/9.24	7.92/9.68
Viscosidad @ 40°C	68.2 cSt	64.79/71.61	61.38/75.02
Índice de viscosidad	102	-	-
Número ácido (AN)	0.04 mg KOH/g	0.07	0.09
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (20min)	40-40-0 (40min)	40-40-0 (60min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +10.000 horas	8.000hrs (-20%)	2.000hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	+2700min	1.485hrs (-45%)	675hrs (-75%)
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	16/14/11	18/15/12	19/16/13
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES (Fe)	Evaluar condición vs AES
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		
Turboflo XL46			
Viscosidad @ 100°C	6.8 cSt	6.46/7.14	6.12/7.48
Viscosidad @ 40°C	46.4 cSt	44.08/48.72	41.76/51.04
Índice de viscosidad	100	-	-
Número ácido (AN)	0.04 mg KOH/g	0.07	0.09
Demulsibilidad mecánica	40-40-0 (15 min)	40-40-0 (35 min)	40-40-0 (55 min)
Oxidación por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Nitración por FTIR	Análisis nuevo	+25% respecto al nuevo	+75% respecto al nuevo
Aditivos por el método molecular	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Aditivos por metodo atómico (AES)	Análisis nuevo	Caída -10%	Caída -25%
Resistencia del lubricante a la oxidación (RULER)	Aumento AN a 2,0 en +10.000 horas	8.000hrs (-20%)	2.000hrs (-80%)
Resistencia del lubricante a la oxidación (RPVOT)	+2700min	1.485hrs (-45%)	675hrs (-75%)
Potencial para generar barniz (MPC)	Claro	Escala de colores	Oscuro
Concentración de agua	0	200	500
Conteo de partículas sólidas	16/14/11	18/15/12	19/16/13
Contaminantes por método atómico	0	-	-
Concentración de partículas ferromagnéticas (DR)	-	<20 WPC	<20 WPC
Concentración de partículas ferromagnéticas (Índice PQ)	-	Evaluar condición vs AES (Fe)	Evaluar condición vs AES (Fe)
Concentración de metales de desgaste (AES)	0	+1 Desv Estandar	+2 Desv Estandar
Método ferrografía analítica	Criterio técnico		

Apéndice D. Cálculo línea base para conteo de partículas

Cálculo en Microsoft Excel con base en la guía de Pall Corporation (2007)

Tabla D1. Lubricación

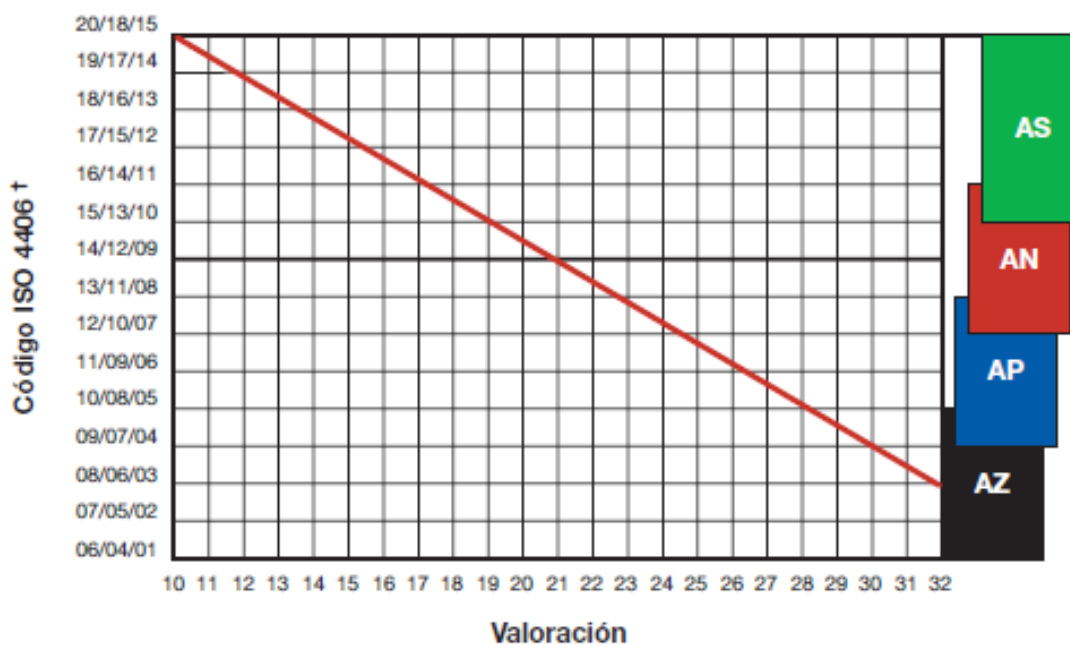
Selección del nivel de limpieza							
Tabla 1. Presión de trabajo y ciclo de trabajo							Actual
Trabajo	Ejemplos	Presión de funcionamiento (bar (psi))					
		0-70 (0-1000)	>70-170 (>1000-2500)	>170-275 (>2500-4000)	>275-410 (>4000-6000)	>410 (>6000)	
Ligero	Trabajo constante	1	1	2	3	4	
Medio	Variaciones de presión moderadas	2	3	4	5	6	
Duro	Presión de cero a total	3	4	5	6	7	1
Muy duro	Presión de cero a total con oscilaciones momentáneas de alta frecuencia	4	5	6	7	8	
Tabla 2. Sensibilidad del componente							
Sensibilidad	Ejemplos	Valoración					Actual
Mínima	Bombas de ariete	1					
Por debajo de la media	Bombas de engranajes de bajo rendimientos, válvulas manuales	2					
Media	Bombas paleta, válvulas de carrete, bombas engranes de alto rendimiento	3					3
Por encima de la media	Bombas de pistón, válvulas de control proporcional	4					
Alta	Válvulas servo, válvulas de control proporcional de alta presión	5					
Muy alta	Válvulas servo de alto rendimiento	6					
Tabla 3. Vida útil del equipo							
Vida útil (horas)	Valoración						Actual
0-1,000	0						
1,000-5,000	1						
5,000-10,000	2						5
10,000-20,000	3						
20,000-40,000	4						
<40,000	5						
Tabla 4. Coste de sustitución del componente							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	Válvulas montadas en colectores, bombas económicas	1					
Media	Válvulas montadas en línea y válvulas modulares	2					3
Alta	Cilindros, válvulas de control proporcional	3					
Muy Alta	Bombas de miston, motores y componentes servo de alto rendimiento	4					
Tabla 5. Coste de parada del equipo							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	El equipo no es crítico para la producción	1					
Media	El equipo representa una pequeña parada	2					3
Alta	El coste de parada es significativo	3					
Muy Alta	Coste de prada muy caro	4					
Tabla 6. Garantía de seguridad							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	Sin garantía	1					
Media	El fallo puede causar riesgos	2					1
Alta	El fallo puede causar lesiones	3					
Tabla 7. Requisito total de limpieza							
Valoración del requisito de limpieza total							Total
Suma de valoración de la tabla 1 a la 6							16
Utilizando la tabla, determine si el número de valoración requerido se cruza con la línea roja. Siga la línea hacia la izquierda para saber el código ISO 4406 determinado.							
Tabla 8. Valoración del entorno							
Entorno	Ejemplos	Valoración					Actual
Excelente	Zonas limpias, pocos puntos de entrada, llenado de fluido filtrado y respiradores	0					
Aceptable	Talleres de máquinas generales, un poco de control en los puntos de entrada	1					1
Pobre	Control mínimo del entorno de funcionamiento	3					
Hostil	Entrada potencialmente elevada (p.e.Fundiciones, cementeras, instalaciones de ensayo)	5					
Tabla 9. Nivel filtración requerido							
Valoración del requisito de limpieza total							Total
Suma de valoración entorno (Tabla 8) y total de limpieza (Tabla 7)							17

Tabla D2. Regulación

Selección del nivel de limpieza							
Tabla 1. Presión de trabajo y ciclo de trabajo							Actual
Trabajo	Ejemplos	Presión de funcionamiento (bar (psi))					
		0-70 (0-1000)	>70-170 (>1000-2500)	>170-275 (>2500-4000)	>275-410 (>4000-6000)	>410 (>6000)	
Ligero	Trabajo constante	1	1	2	3	4	
Medio	Variaciones de presión moderadas	2	3	4	5	6	
Duro	Presión de cero a total	3	4	5	6	7	1
Muy duro	Presión de cero a total con oscilaciones momentáneas de alta frecuencia	4	5	6	7	8	
Tabla 2. Sensibilidad del componente							
Sensibilidad	Ejemplos	Valoración					Actual
Mínima	Bombas de ariete	1					
Por debajo de la media	Bombas de engranajes de bajo rendimientos, válvulas manuales	2					
Media	Bombas paleta, válvulas de carrete, bombas engranes de alto rendimiento	3					3
Por encima de la media	Bombas de pistón, válvulas de control proporcional	4					
Alta	Válvulas servo, válvulas de control proporcional de alta presión	5					
Muy alta	Válvulas servo de alto rendimiento	6					
Tabla 3. Vida útil del equipo							
Vida útil (horas)	Valoración					Actual	
0-1,000	0						
1,000-5,000	1						
5,000-10,000	2					5	
10,000-20,000	3						
20,000-40,000	4						
<40,000	5						
Tabla 4. Coste de sustitución del componente							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	Válvulas montadas en colectores, bombas económicas	1					
Media	Válvulas montadas en línea y válvulas modulares	2					3
Alta	Cilindros, válvulas de control proporcional	3					
Muy Alta	Bombas de miston, motores y componentes servo de alto rendimiento	4					
Tabla 5. Coste de parada del equipo							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	El equipo no es crítico para la producción	1					
Media	El equipo representa una pequeña parada	2					2
Alta	El coste de parada es significativo	3					
Muy Alta	Coste de prada muy caro	4					
Tabla 6. Garantía de seguridad							
Coste	Ejemplos	Valoración					Actual
Bajo	Sin garantía	1					
Media	El fallo puede causar riesgos	2					1
Alta	El fallo puede causar lesiones	3					
Tabla 7. Requisito total de limpieza							
Valoración del requisisto de limpieza total						Total	
Suma de valoración de la tabla 1 a la 6						15	
Utilizando la tabla, determine si el número de valoración requerido se cruza con la línea roja. Siga la línea hacia la izquierda para saber el código ISO 4406 determinado.							
Tabla 8. Valoración del entorno							
Entorno	Ejemplos	Valoración					Actual
Excelente	Zonas limpias, pocos puntos de entrada, llenado de fluido filtrado y respiradores	0					
Aceptable	Talleres de máquinas generales, un poco de control en los puntos de entrada	1					1
Pobre	Control mínimo del entorno de funcionamiento	3					
Hostil	Entrada potencialmente elevada (p.e.Fundiciones, cementeras, instalaciones de ensayo)	5					
Tabla 9. Nivel filtración requerido							
Valoración del requisisto de limpieza total						Total	
Suma de valoración entorno (Tabla 8) y total de limpieza (Tabla 7)						16	

Según el valor obtenido del cálculo anterior, con la siguiente ilustración se determina el nivel de limpieza objetivo:

Tabla D3. Diagrama de cálculo



Fuente: Pall Corporation (2007).

Apéndice E. Herramienta gráfica Excel

Tabla E1. Tabla de datos y límites de los análisis de aceite en la CH La Esperanza

INFORMACION DE LA MUESTRA							SALUD					
Fecha muestra	ID muestra	Reporte N°	Fecha Reporte	HORAS Equipo	HORAS Aceíte	Rellenos litros	Visc. cSt 40°C	Visc. cSt 100°C	AN	FT-IR		Agua (ppm)
										Oxid	Nitr	
							48.84	7.37	0.170	25	25	500
							46.62	7.04	0.150	15	15	200
							42.18	6.37				
							39.96	6.03				
02/Jan/21	PC0035931	0	01/Jan/21	25,633	0	0	45.70	6.80	0.020	0	0	0
25/Feb/21	PC0036166	1	25/Feb/21	27,824	0	0	45.50	6.70	0.040	0	0	0
21/Apr/21	PC0035956	2	21/Apr/21	28,696	28,696	0	45.80	6.80	0.060	0	0	0
22/Sep/21	PC0051740	3	22/Sep/21	31,830	0	0	45.60	6.80	0.040	0	0	13

ADITIVOS										CONTAMINACIÓN					
S	P	Mo	Mn	Ba	Zn	Ca	B	Litio		CODIGO ISO 4406-99			Si	Na	K
Azufre	Fósforo	Molibdeno	Magnesio	Bario	Zinc	Calcio	Boro	Litio		4µm	6µm	14µm	Silicio	Sodio	Potasio
		5	5	5	5	5	5	5		500000	64000	8000	7	7	10
		1	1	1	2	1	1	1		250000	32000	4000	1	1	3
600	10														
540	5														
665	13	0	0	0	2	1	0	1		218	37	1	1	0	1
630	12	0	0	0	2	1	1	1		1916	353	10	1	1	0
611	12	0	0	0	2	1	1	1		892	147	7	1	1	0
612	12	0	0	0	2	1	1	1		653	137	13	1	0	1

DESGASTE													OBSERVACIONE
Cu Cobre	Fe Hierro	Cr Cromo	Ni Niquel	Ti Titanio	V Vanadio	Cd Cadmio	Ag Plata	Pb Plomo	Sn Estaño	Sb Antimonio	Al Aluminio	PQ Index	
5	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	100	
2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	50	
1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1		
1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1		
1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1		
1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0		

Gráfico E1. Datos de AN, oxidación y nitración con sus límites

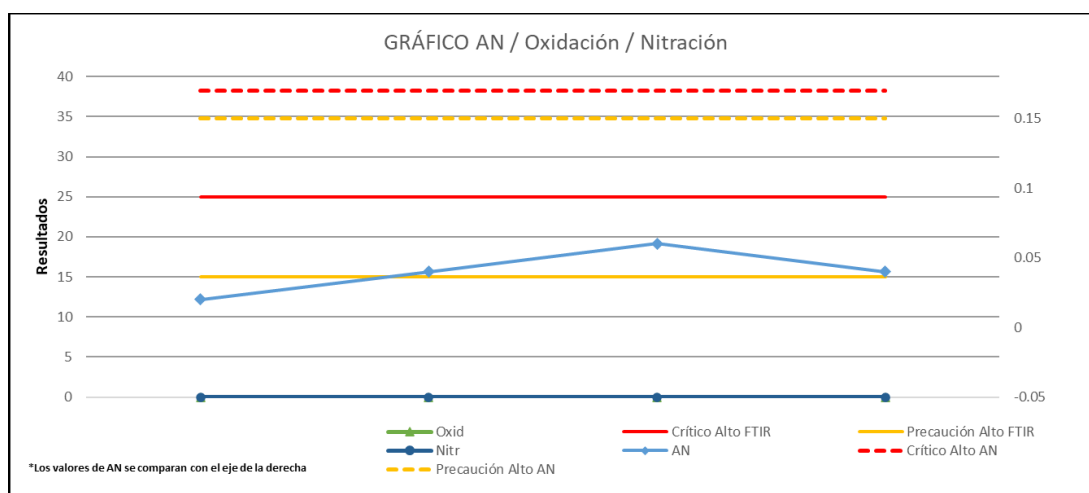


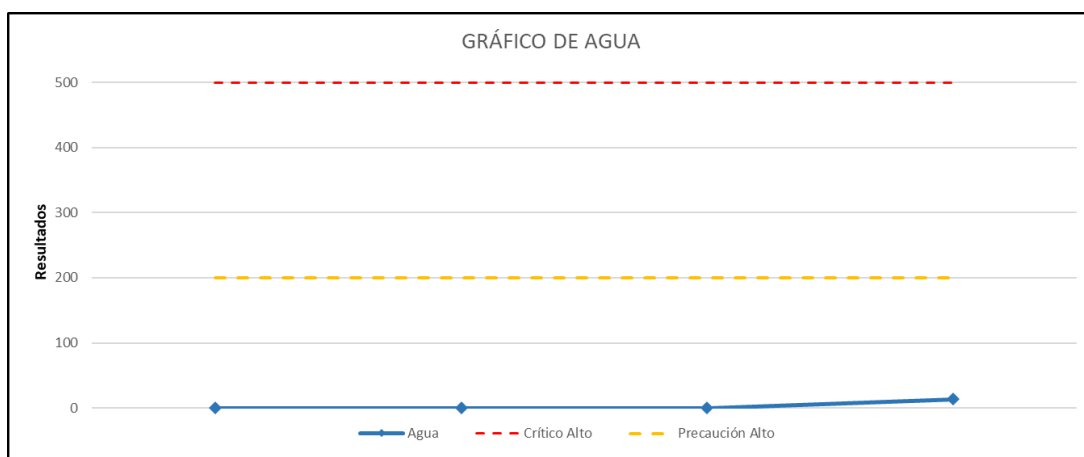
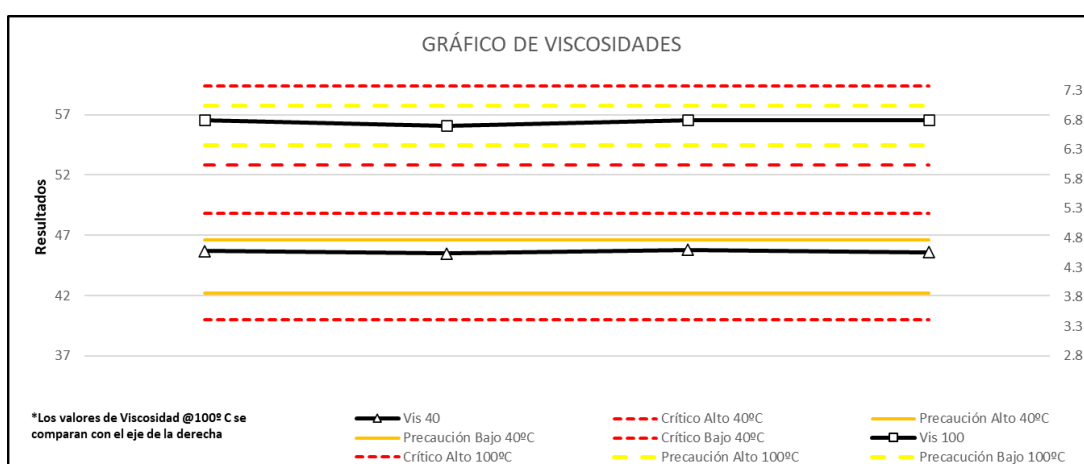
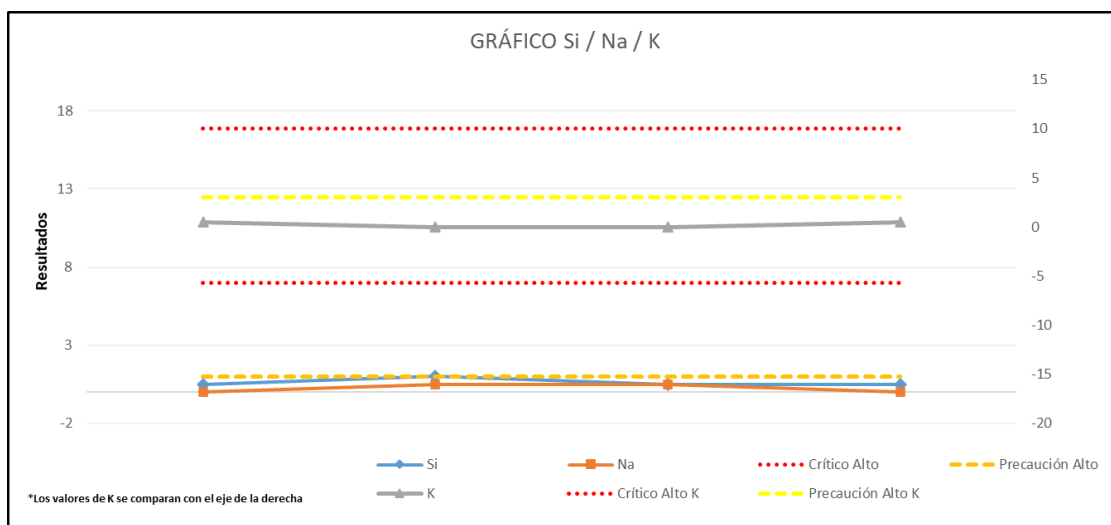
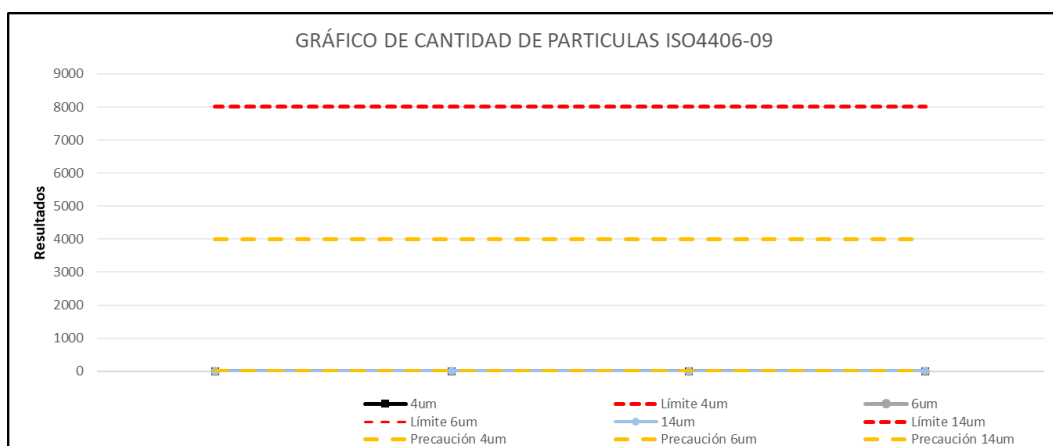
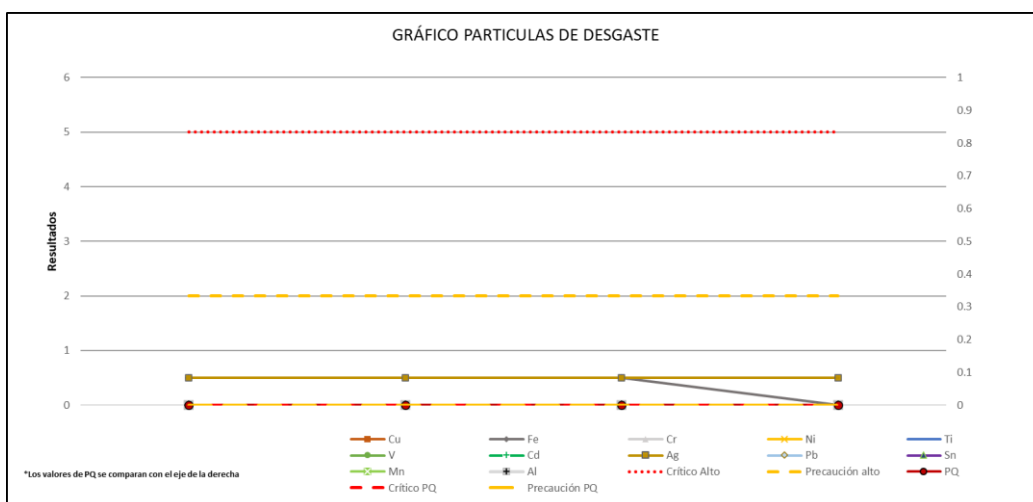
Gráfico E2. Datos de cantidad de agua, con sus límites**Gráfico E3.** Datos de viscosidades, con sus límites**Gráfico E4.** Datos de contaminación por SI, Na y K con sus respectivos límites

Gráfico E5. Datos de contaminación de partículas ISO 4406 con sus límites**Gráfico E6.** Datos partículas de desgaste y sus límites

Apéndice F. Cálculo de la frecuencia

Tabla F1. Parámetros de selección para la frecuencia estándar

Cálculo de la frecuencia estándar											
	Tipo de componente a muestrear	Frecuencia	Criticidad Global de la Máquina (OMC) Muy Alta Normal Baja 1.25								
Equipo móvil	Diferenciales, mandos finales y transmisiones	500 h									
	Motores de combustión interna diésel	250 h	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
	Hidráulicos equipo móvil	500 h	Seleccione el factor de penalización por la falla: Considere aspectos de seguridad, costos e impacto.								
	Motores recíprocos de aviación	100 h									
	Transmisiones e hidráulicos de aviación	150 h									
	Turbinas de aviación	100 h									
Equipo industrial	Engranes (más de 100rpm)	500 h									
	Engranes (menos de 100rpm)	2000 h									
	Hidráulicos	750 h									
	Compresores	750 h									
	Cojinetes y rodamientos	750 h									
	Turbinas de gas	500 h									
	Turbinas de vapor e hidráulicas	750 h									
Seleccione el factor de ajuste según: Presión, carga, temperatura, contaminación, humedad y severidad de trabajo.											
Frecuencia estándar de muestreo Frecuencia de referencia 750.00 Factor de ajuste más bajo 1.25 Frecuencia Estándar (SSF) - horas 937.50											
Frecuencia seleccionada		750									

Tabla F2. Parámetros de selección para la frecuencia ajustada

Cálculo de la frecuencia ajustada

Edad de la máquina (MA) - % de vida útil restante													Factor
100	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	2		
0.10	0.50	1.00	1.50	2.00	2.00	2.00	1.50	1.00	0.50	0.10			

Edad del lubricante (LA) - % de vida útil restante											Factor
100	95	85	75	65	55	45	35	25	15	2	
0.10	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50	1.00	0.50	0.25	0.10		

Resultados del monitoreo condición (CM)									Factor
Crítico			Precaución			Normal			2
0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	

Frecuencia ajustada de muestreo (horas)

Frecuencia estándar (SSF)	937.50
Factor de ajuste más bajo (MA, LA o CM)	2.00
Frecuencia ajustada (TEMPORAL)	1875.000

Tabla F3. Evaluación de los distintos escenarios para la frecuencia ajustada

Evaluación de estados			
Valor	Normal	Anormal	Crítico
Frec. Base	750	750	750
OMC	1.25	1.25	1.25
FES	1.25	1.25	1.25
SSF	937.5	937.5	937.5
MA	2	1	0.5
LA	2	1	1
CM	2	0.75	0.25
Tiempo (hrs)	1875	703.125	234.375
Tiempo (días)	80	29	10

Apéndice G. Cálculo de valor de purga

Tabla G1. Datos de diámetro interno y longitud del puerto de muestreo y la manguera

Válvula y conector de toma	Longitud (pulgadas)	DI (pulgadas)	Manguera	DI (pulgadas)
Tognella FT 290—14	4"	0.22	1/16"	0.08

$$Volumen\ purga\ (ml) = (At * Lt + Am * Lm) * 10 * 16.387$$

Longitud de manguera de 5 in:

$$Volumen\ purga\ (ml) = \left(\left(\pi * \frac{0.22''^2}{4} \right) * 4'' + \left(\pi * \frac{0.08''^2}{4} \right) * 5'' \right) * 10 * 16.387$$

$$Volumen\ purga\ (ml) = 29.035ml$$

Longitud de manguera de 10 in:

$$Volumen\ purga\ (ml) = \left(\left(\pi * \frac{0.22''^2}{4} \right) * 4'' + \left(\pi * \frac{0.08''^2}{4} \right) * 10'' \right) * 10 * 16.387$$

$$Volumen\ purga\ (ml) = 33.153ml$$

Longitud de manguera de 20 in:

$$Volumen\ purga\ (ml) = \left(\left(\pi * \frac{0.22''^2}{4} \right) * 4'' + \left(\pi * \frac{0.08''^2}{4} \right) * 20'' \right) * 10 * 16.387$$

$$Volumen\ purga\ (ml) = 41.390ml$$

Longitud de manguera de 27 in:

$$Volumen\ purga\ (ml) = \left(\left(\pi * \frac{0.22''^2}{4} \right) * 4'' + \left(\pi * \frac{0.08''^2}{4} \right) * 27'' \right) * 10 * 16.387$$

$$Volumen\ purga\ (ml) = 47.156ml$$

Apéndice H. Costos de las centrales hidroeléctricas

Tabla H1. Costo de los lubricantes

Costo de lubricantes			
Central	Costo	Periodo	Costo anual
Chocosuela 1	¢2.299.171,52	Cada año	¢2.299.171,52
Chocosuela 2	¢2.299.171,52	Cada año	¢2.299.171,52
Chocosuela 3	¢2.299.171,52	Cada año	¢2.299.171,52
La Esperanza	¢7.686.000,00	5 años	¢1.281.000,00
Platanar	¢825.300,00	Cada año	¢825.300,00

Tabla H2. Costos de los filtros

Costo de filtros			
Central	Costo	Periodo	Costo anual
Chocosuela 1	¢114.577,00	Cada año	¢114.577,00
Chocosuela 2	¢114.577,00	Cada año	¢114.577,00
Chocosuela 3	¢114.577,00	Cada año	¢114.577,00
La Esperanza	¢1.890.000,00	5 años	¢315.000,00
Platanar	¢409.500,00	Cada 6 meses	¢819.000,00

Tabla H3. Costos de mano de obra

Costo de mano de obra			
Central	Costo	Periodo	Costo por hora
Chocosuela 1	¢616.803,24	mensual	¢2.570,01
Chocosuela 2	¢616.803,24	mensual	¢2.570,01
Chocosuela 3	¢616.803,24	mensual	¢2.570,01
La Esperanza	¢600.000,00	mensual	¢2.500,00
Platanar	¢484.000,00	mensual	¢2.016,67

Tabla H4. Costo de producción

Costo de producción			
Central	Costo	Periodo	Costo por hora
Chocosuela 1	¢439.056,00	Punta	¢439.056,00
Chocosuela 2	¢328.392,00	Valle	¢328.392,00
Chocosuela 3	¢215.928,00	Noche	¢215.928,00
La Esperanza	¢164.541,03	Punta	¢164.541,03
Platanar	¢465.000,00	Punta	¢465.000,00

Apéndice I. Flujos de Microsoft Excel

Tabla I1. Flujos del escenario 1

Costo fijo anual	₺	1,939,500.00
Porcentaje mejora		60%
Perdidas en fallas/mensual	₺	216,680.36

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Ganancias (Antes-Ahora)		₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54	₺ 325,020.54
Ganancia Falla mayor		₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31	₺ 5,806,501.31
Costo de implementación		₺ 293,957.17	₺ 294,692.06	₺ 295,428.79	₺ 296,167.36	₺ 296,907.78	₺ 297,650.05	₺ 298,394.17	₺ 299,140.16	₺ 299,888.01	₺ 300,637.73	₺ 301,389.32	₺ 302,142.80
Utilidad		₺ 5,837,564.68	₺ 5,836,829.79	₺ 5,836,093.06	₺ 5,835,354.49	₺ 5,834,614.07	₺ 5,833,871.80	₺ 5,833,127.67	₺ 5,832,381.69	₺ 5,831,633.84	₺ 5,830,884.12	₺ 5,830,132.52	₺ 5,829,379.05
Gastos de mantenimiento		₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36	₺ 216,680.36
Depreciación de equipo		₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43	₺ 22,256.43
Flujo neto efectivo operativo		₺ 5,598,627.89	₺ 5,597,893.00	₺ 5,597,156.27	₺ 5,596,417.70	₺ 5,595,677.28	₺ 5,594,935.01	₺ 5,594,190.88	₺ 5,593,444.90	₺ 5,592,697.05	₺ 5,591,947.33	₺ 5,591,195.73	₺ 5,590,442.26
Recuperación venta de equipo													
Inversión inicial	₺ (13,691,421.00)												
Flujo neto efectivo	₺ (13,691,421.00)	₺ 5,598,627.89	₺ 5,597,893.00	₺ 5,597,156.27	₺ 5,596,417.70	₺ 5,595,677.28	₺ 5,594,935.01	₺ 5,594,190.88	₺ 5,593,444.90	₺ 5,592,697.05	₺ 5,591,947.33	₺ 5,591,195.73	₺ 5,590,442.26
FLUJO NETO ACUMULADO		₺ 5,598,627.89	₺ 11,196,520.89	₺ 16,793,677.16	₺ 22,390,094.86	₺ 27,985,772.14	₺ 33,580,707.15	₺ 39,174,898.03	₺ 44,768,342.93	₺ 50,361,039.98	₺ 55,952,987.30	₺ 61,544,183.04	₺ 67,134,625.30
FLUJO NETO VALOR PRESENTE		₺ 5,089,661.72	₺ 4,626,357.85	₺ 4,205,226.35	₺ 3,822,428.59	₺ 3,474,475.34	₺ 3,158,194.95	₺ 2,870,704.47	₺ 2,609,383.33	₺ 2,371,849.50	₺ 2,155,937.77	₺ 1,959,680.00	₺ 1,781,287.19
FLUJO NETO ACUMULADO PRESENTE		₺ 5,089,661.72	₺ 9,716,019.57	₺ 13,921,245.92	₺ 17,743,674.51	₺ 21,218,149.85	₺ 24,376,344.80	₺ 27,247,049.27	₺ 29,856,432.59	₺ 32,228,282.09	₺ 34,384,219.86	₺ 36,343,899.85	₺ 38,125,187.04

Tabla I2. Flujos del escenario 2

Costo fijo anual	₺	1,939,500.00
Perdidas en fallas/mensual	₺	-
Porcentaje mejora		0%

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Ganancias (Antes-Ahora)		₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59	₺ 1,070,572.59
Costo de implementación		₺ 161,625.00	₺ 162,029.06	₺ 162,434.14	₺ 162,840.22	₺ 163,247.32	₺ 163,655.44	₺ 164,064.58	₺ 164,474.74	₺ 164,885.93	₺ 165,298.14	₺ 165,711.39	₺ 166,125.66
Utilidad		₺ 908,947.59	₺ 908,543.52	₺ 908,138.45	₺ 907,732.37	₺ 907,325.27	₺ 906,917.15	₺ 906,508.01	₺ 906,097.85	₺ 905,686.66	₺ 905,274.45	₺ 904,861.20	₺ 904,446.92
Flujo neto efectivo operativo		₺ 908,947.59	₺ 908,543.52	₺ 908,138.45	₺ 907,732.37	₺ 907,325.27	₺ 906,917.15	₺ 906,508.01	₺ 906,097.85	₺ 905,686.66	₺ 905,274.45	₺ 904,861.20	₺ 904,446.92
Inversión inicial	₺ (4,722,346.00)												
Flujo neto efectivo	₺ (4,722,346.00)	₺ 908,947.59	₺ 908,543.52	₺ 908,138.45	₺ 907,732.37	₺ 907,325.27	₺ 906,917.15	₺ 906,508.01	₺ 906,097.85	₺ 905,686.66	₺ 905,274.45	₺ 904,861.20	₺ 904,446.92
FLUJO NETO ACUMULADO		₺ 908,947.59	₺ 1,817,491.11	₺ 2,725,629.56	₺ 3,633,361.93	₺ 4,540,687.19	₺ 5,447,604.34	₺ 6,354,112.35	₺ 7,260,210.20	₺ 8,165,896.86	₺ 9,071,171.31	₺ 9,976,032.51	₺ 10,880,479.43
FLUJO NETO VALOR PRESENTE		₺ 826,315.99	₺ 750,862.42	₺ 682,297.86	₺ 619,993.42	₺ 563,377.60	₺ 511,931.09	₺ 465,181.94	₺ 422,701.33	₺ 384,099.56	₺ 349,022.49	₺ 317,148.33	₺ 288,184.66
FLUJO NETO ACUMULADO PRESENTE		₺ 826,315.99	₺ 1,577,178.40	₺ 2,259,476.26	₺ 2,879,469.68	₺ 3,442,847.29	₺ 3,954,778.38	₺ 4,419,960.32	₺ 4,842,661.65	₺ 5,226,761.21	₺ 5,575,783.70	₺ 5,892,932.03	₺ 6,181,116.69

Apéndice J. Escenarios y probabilidad financiera del proyecto

Tabla J1. Evaluación de las variables para las tres situaciones posibles del proyecto

Escenarios	Pesimista	Normal	Optimista
Probabilidad	35%	50%	15%
Porcentaje de mejora	10%	50%	70%
Aumento gastos	10%	4%	0%
Inversion	15%	2%	0%
VAN	19,369,133.20	23,505,034.17	25,171,962.64
TIR	33%	39%	41%

Gráfico J1. Datos de los tres escenarios para la TIR

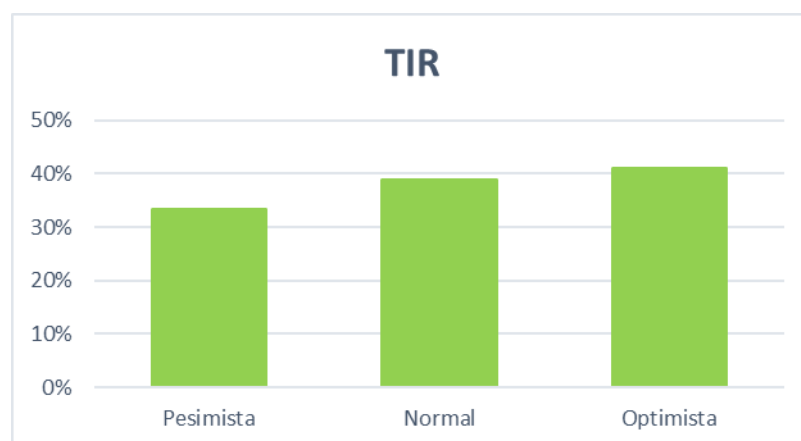


Gráfico J2. Datos de los tres escenarios para el VAN

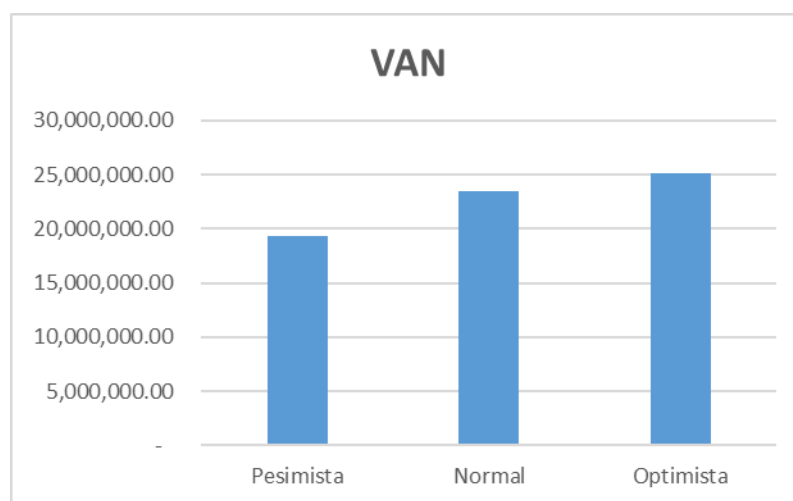


Tabla J2. Datos para la estimación de la probabilidad del proyecto

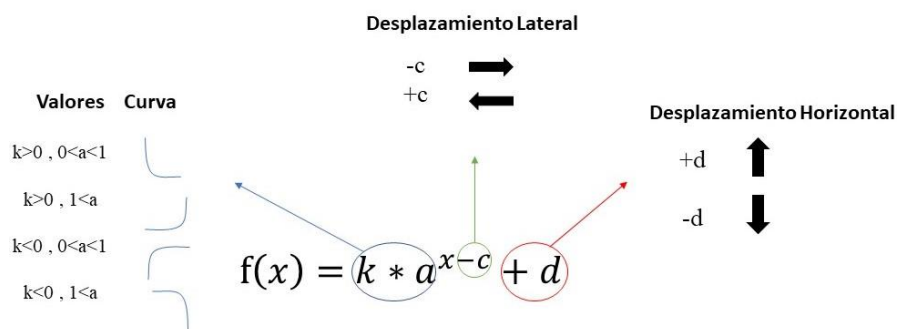
Cálculo de VAN y TIR Esperado			Px	VAN*Prob	TIR*Prob	(VAN-EVAN)2*Px
	VAN	TIR	Probabilidad	EVAN	ETIR	VARIANZA
Escenario Optimista	25,171,963	41%	15%	3,775,794	6.15%	1,230,764,974,551
Escenario Normal	23,505,034	39%	50%	11,752,517	19.47%	717,034,340,345
Escenario Pesimista	19,369,133	33%	35%	6,779,197	11.67%	3,021,916,467,901
Indicador Esperado				22,307,508	37.29%	
K	10.00%				Suma Varianza	4,969,715,782,797
					Desv. Estand (σ)	2,229,286

Tabla J3. Datos resultado de la probabilidad del proyecto financieramente

Variación	Probabilidad que el VAN sea	VAN E	Desv. Estand (σ)	Valor Z		Rango de confianza
VAN E- 3σ	15,619,650	22,307,508	2,229,286	-3		99.74%
VAN E- 2σ	17,848,936	22,307,508	2,229,286	-2		95.44%
VAN E- 1σ	20,078,222	22,307,508	2,229,286	-1		68.26%
VAN E	22,307,508	22,307,508	2,229,286	0		50.00%
VAN E + 1σ	24,536,794	22,307,508	2,229,286	1		68.26%
VAN E + 2σ	26,766,080	22,307,508	2,229,286	2		95.44%
VAN E + 3σ	28,995,366	22,307,508	2,229,286	3		99.74%

Apéndice K. Cálculos del Software de simulación para la estimación del beneficio en la disponibilidad

Ecuación K1. Parámetros de la función exponencial



Fuente: Elaboración propia con base en Owls Academy (2017).

Gráfico K1. Curva de mejor ajuste y ecuación para extensión de vida por partículas

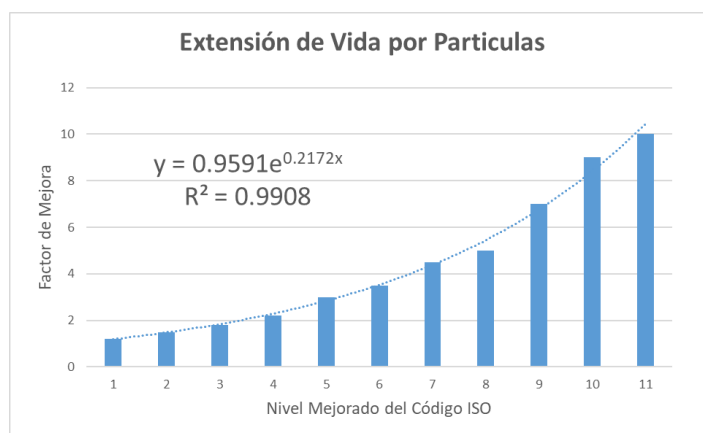
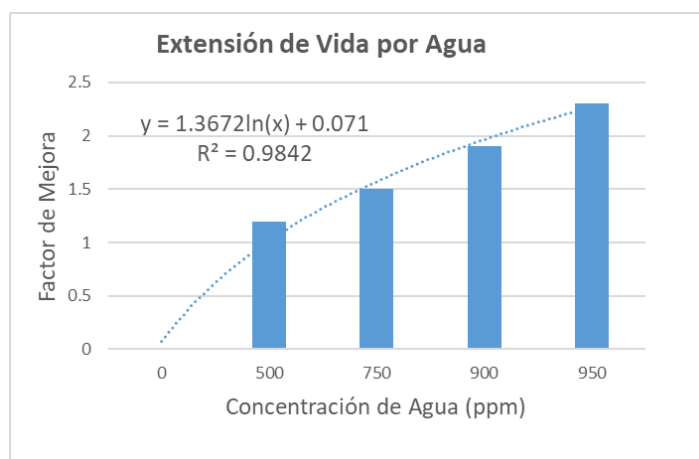


Gráfico K2. Curva de mejor ajuste y ecuación para extensión de vida por agua

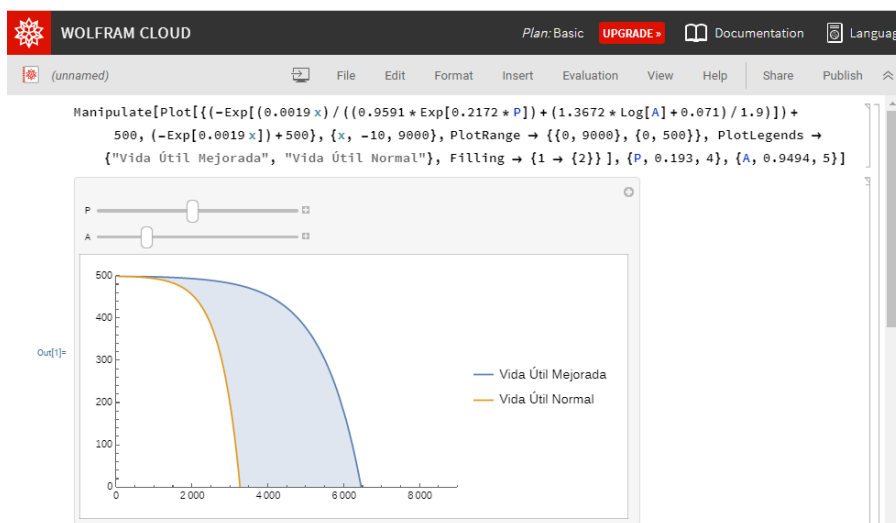


Código de extensión de la vida útil

```

Manipulate[Plot[{{(-Exp[(0.0019x)/((0.9591*Exp[0.2172*P])+(1.3672*Log[A]+0.071)/1.9)))+500,
(-Exp[0.0019x])+500},{x,-10,9000},PlotRange->{{0,9000},{0,500}},
PlotLegends->{"Vida Útil Mejorada","Vida Útil Normal"},
Filling->{1->{2}}],{P,0.193,4},{A,0.9494,5}]

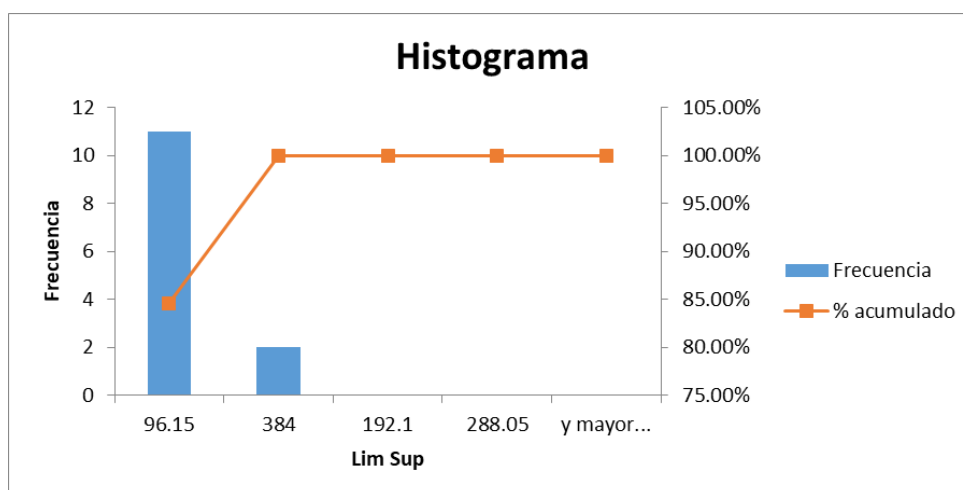
```



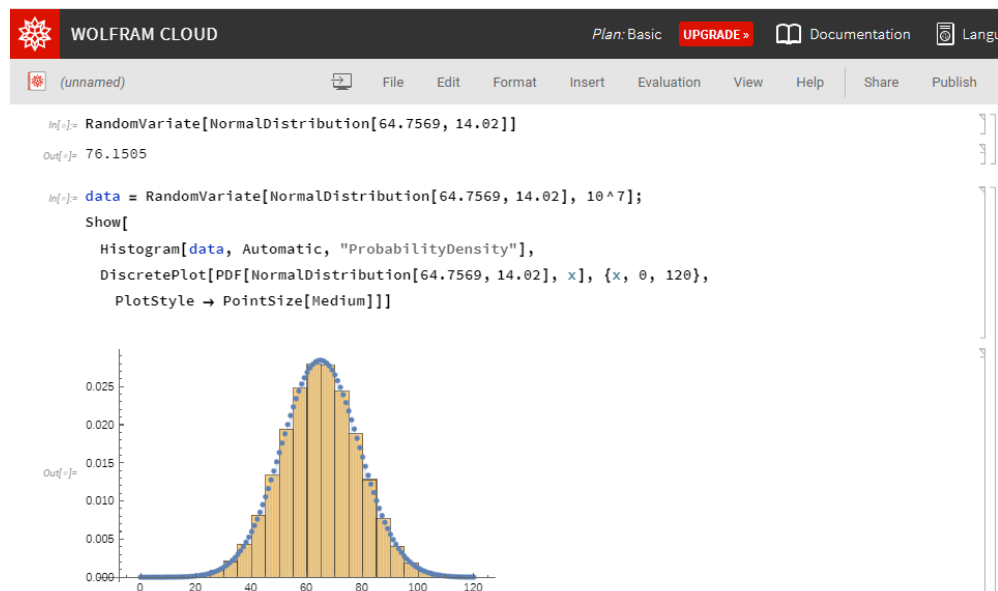
Datos de fallas del último año

Media	5.280926573
Promedio	64.75692308
Mediana	3.25
Desv Est	14.02
Max	384
Min	0.2

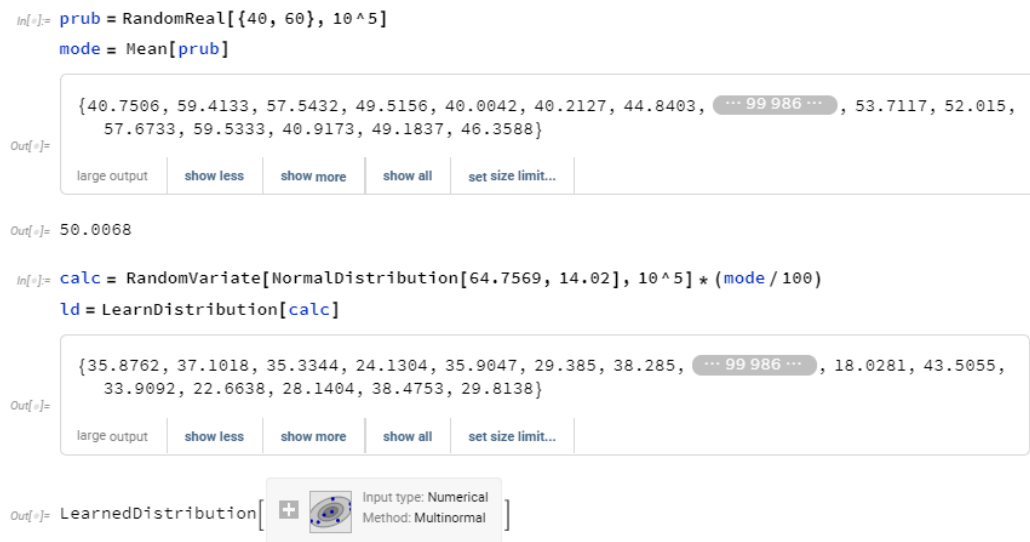
Gráfica K3. Histograma de fallas



Código de estimación para fallas sin el AA



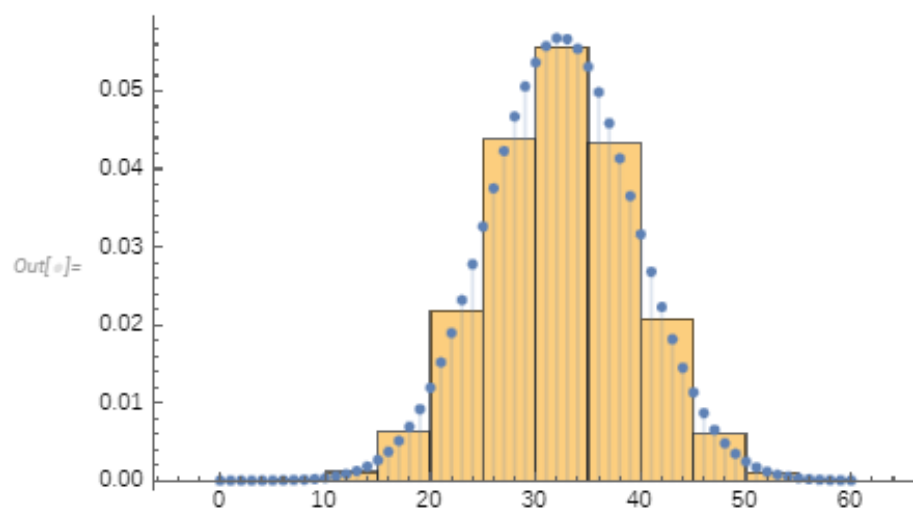
Código de estimación para fallas con el AA



```

In[ ]:= Show[
  Histogram[calc, Automatic, "ProbabilityDensity"],
  DiscretePlot[PDF[ld, x], {x, 0, 60},
    PlotStyle -> PointSize[Medium]]]

```



Estimación de ganancia monetaria por la mejora calculada por el *software*

$\text{Monto}(\text{₡}) = \text{Días del mes} * 3,948,984.75 \text{ (Promedio de generación por día)} * 82 \% \text{ (% de producción quitando llena de embalse)}$

	Año 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Flujos Ideales		₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 100,772,440.60	₡ 91,020,268.93	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71
Flujos Reales		₡ 95,951,617.07	₡ 98,122,125.41	₡ 95,376,238.94	₡ 98,212,820.61	₡ 99,069,386.35	₡ 90,510,555.42	₡ 45,347,598.27	₡ 94,654,578.24	₡ 99,341,471.94	₡ 95,239,708.54	₡ 97,537,645.26	₡ 95,824,838.84
Flujos Esperados	₡ (4,722,346.00)	₡ 95,951,617.07	₡ 98,122,125.41	₡ 95,376,238.94	₡ 98,212,820.61	₡ 99,069,386.35	₡ 90,510,555.42	₡ 65,156,436.92	₡ 94,654,578.24	₡ 99,341,471.94	₡ 95,239,708.54	₡ 97,537,645.26	₡ 95,824,838.84
Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	Mes 19	Mes 20	Mes 21	Mes 22	Mes 23	Mes 24	Suma	
₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 100,772,440.60	₡ 91,020,268.93	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡ 100,772,440.60	₡ 97,521,716.71	₡	2,366,526,992.12
₡ 95,951,617.07	₡ 98,122,125.41	₡ 95,376,238.94	₡ 98,212,820.61	₡ 99,069,386.35	₡ 90,510,555.42	₡ 45,347,598.27	₡ 94,654,578.24	₡ 99,341,471.94	₡ 95,239,708.54	₡ 97,537,645.26	₡ 95,824,838.84	₡	2,210,377,169.76
												₡ (1,939,500.00)	
₡ 95,951,617.07	₡ 98,122,125.41	₡ 95,376,238.94	₡ 98,212,820.61	₡ 99,069,386.35	₡ 90,510,555.42	₡ 65,156,436.92	₡ 94,654,578.24	₡ 99,341,471.94	₡ 95,239,708.54	₡ 97,537,645.26	₡ 95,824,838.84	₡	2,241,393,501.06
TOTAL											₡	31,016,331.30	

Gráfica K4. Evaluación financiera de ganancia por mejora de disponibilidad calculada a partir del *software*

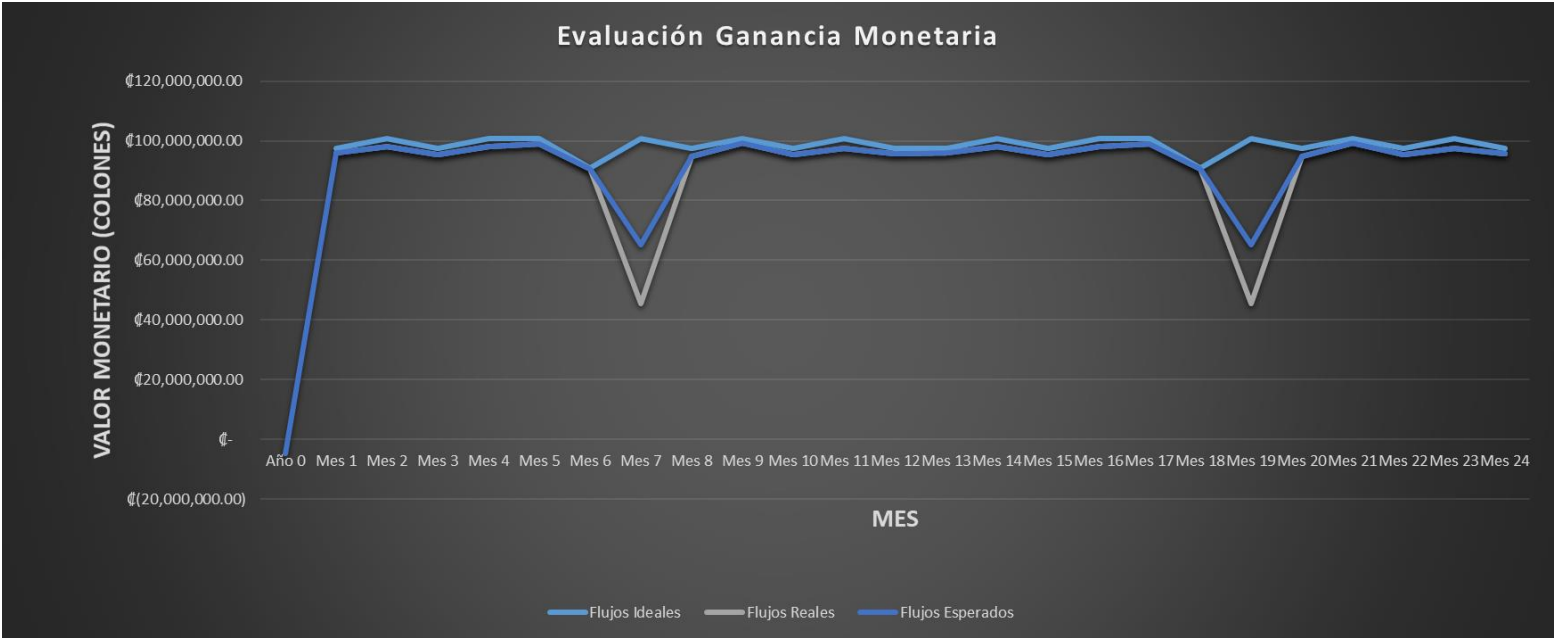


Tabla K1. Valores netos de ganancia financiera

Porcentaje	
35.74%	

Ganancia a 2 años	
₡	31,016,331.30

Ganancia a 1 años	
₡	15,508,165.65

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS
FINALES DE GRADUACIÓN
UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL**

Heredia, 10/05/2022

Señores

Vicerrectoría de Investigación

Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores:

Yo Jason David Badilla Mora portador de la cédula de identidad número 117070916. En mi calidad de autor del trabajo de graduación titulado: Estudio del beneficio del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM con el aporte de un programa de lubricación, en el sistema turbogenerador de una central hidroeléctrica.

El cual se presenta bajo la modalidad de:

X Proyecto de graduación

Presentado en la fecha 05/05/2022, AUTORIZO A LA Universidad Técnica Nacional, Sede Central, para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizo	SI	NO
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	X	
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X	
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X	
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	X	
Consulta electrónica con texto protegido	X	
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X	
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas	X	

Por otra parte declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizo que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological

Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. Confío en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.

Firma: _____

Cédula: 1-1707-0916

Día: 05/10/2022