

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**ANÁLISIS DE SISTEMA Y PROCEDIMIENTO DE LUBRICACIÓN EN  
TURBOGENERADORES CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCIÓN.S.A.**

Informe de Habilitación Profesional  
presentado en conformidad a los requisitos  
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:  
**Sr. Claudio Villegas**

**JUAN OPAZO MEDINA**  
**CONCEPCIÓN – CHILE**

## **SUMARIO**

En el presente informe de habilitación profesional, se estudian los sistemas de lubricación forzada utilizados para lubricar los cojinetes turbina-generator. Estos pertenecen actualmente a las cinco plantas de cogeneración eléctrica que posee Celulosa Arauco y Constitución S.A., en las cuales existe variabilidad tanto en los diseños como en los procedimientos de mantención que se realizan en estos equipos.

Se centraliza el estudio en el sistema de lubricación del turbogenerador fase uno, ubicado en la Planta Nueva Aldea, analizando parámetros de operación, control y equipamiento. Se hace énfasis en los parámetros admisibles de operación que producen una paralización programada y una detención imprevista. Esta información fue recopilada de manuales del diseñador, tales como Siemens, NovoPignone y Man.

Posteriormente, teniendo claro dichos parámetros, se utiliza la metodología de análisis Hazop, la cual permite identificar las desviaciones de diseño y riesgos potenciales, aplicándola al sistema de lubricación aceite de emergencia del turbogenerador. Esta metodología es ampliamente ocupada en refinerías y centrales energéticas, donde se busca aumentar la confiabilidad del equipo.

Como resultado del análisis se obtienen desviaciones o modos de falla correspondientes al sistema, las cuales se evaluaron según su criticidad, obteniendo cuatro nodos críticos, los cuales afectan directamente la confiabilidad operacional del turbogenerador.

Posteriormente, para tener un estado global de la situación de cada sistema, se evaluó la condición de estos nodos críticos en los sistemas aceite de emergencia de las otras plantas de cogeneración pertenecientes al complejo.

Finalmente, se obtuvo una estandarización del sistema de lubricación de emergencia, logrando un diseño óptimo, que asegure el funcionamiento adecuado del proceso. Así mismo el análisis ayudará a tomar decisiones y aplicar las políticas de mantenimiento adecuadas.

## ÍNDICE

<b>SUMARIO .....</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>9</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 1 : ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>10</b>
1.1.- Proceso Productivo.....	10
1.1.1.- Procesos de fabricación en la línea de fibras.....	11
1.1.2.- Línea de recuperación de energía.....	11
1.2.- Antecedentes de turbogeneradores.....	12
1.3.-Antecedentes de falla por lubricación en Nueva Aldea Fase I.....	13
<b>Capítulo 2 : SISTEMAS DE LUBRICACIÓN.....</b>	<b>16</b>
2.1.- Sistema aceite de lubricación.....	17
2.1.1.-Estanque de aceite principal.....	21
2.1.2.-Enfriadores de aceite.....	24
2.1.3.-Filtros de aceite de lubricación.....	27
2.1.4.-Estanque Run-Down de aceite.....	30
2.1.5.-Clarificador de aceite.....	32
2.1.6.-Bombas de aceite.....	34
2.2.- Sistema aceite de control.....	37
2.3.- Sistema aceite de levante.....	40
<b>Capítulo 3 : METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....</b>	<b>43</b>
3.1.-Mantenimiento.....	43
3.2.-Confiabilidad.....	44
3.3.- Análisis funcional de operatividad Hazop.....	48
3.3.1.- Metodología.....	49
<b>Capítulo 4 : DESARROLLO DE METODOLOGÍA.....</b>	<b>53</b>

4.1.- Descripción de la instalación.....	54
4.2.- Definición de nodos o elementos críticos. ....	58
4.3.- Definición de variables y palabras guías.....	61
4.4.- Análisis área de diseño y operatividad.....	62
4.6.- Evaluación de la magnitud del riesgo o criticidad del sistema. ....	63
4.6.1.- Parámetros utilizados.....	63
4.6.2-Resultados de criticidad.....	65
4.7.-Análisis de sistemas de lubricación en plantas.....	70
4.7.1.-Nueva Aldea Turbogeneradores TG-2 y TG-3.....	71
4.7.2.-Licancel turbogeneradores TG-1 y TG-2. ....	74
4.7.4.-Horcones turbogeneradores TG-2, TG-3, TG-4/5, TG-6. ....	77
4.7.5.-Constitución turbogeneradores TG-1 y TG-2.....	84
4.7.6.-Valdivia turbogeneradores TG-1 y TG-2. ....	87
<b>CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO I : LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO II : ESPECIFICACIONES ACEITE PARA TURBOGENERADORES.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO III : NORMAS DE ACEITE PARA TURBOGENERADORES. ....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO IV: ANALISIS HAZOP A SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE EMERGENCIA....</b>	<b>113</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>140</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Proceso productivo Celulosa Arauco y Constitución S.A.....	10
Figura 1-2: Balance energético en GWh. ....	13
Figura 1-3: Cojinete hidrodinámico radial. ....	14
Figura 1-4: Cojinete hidrodinámico axial. ....	14
Figura 1-5: Rotor turbina. ....	14
Figura 1-6: Elementos filtrantes. ....	15
Figura 2-1: Sistema de lubricación.....	16
Figura 2-2: Sub-Sistemas aceite de lubricación. ....	17
Figura 2-3: Sistema aceite de lubricación. ....	18
Figura 2-4: Flujo sistema aceite de lubricación. ....	19
Figura 2-5: Estanque de aceite principal. ....	21
Figura 2-6: Estanque de aceite principal	21
Figura 2-7: Calefactor de aceite	21
Figura 2-8: Extractor de vahos. ....	22
Figura 2-9: Flujo estanque de aceite principal. ....	23
Figura 2-10: Enfriadores de aceite	24
Figura 2-11: Intercambiadores de calor	24
Figura 2-12: Flujo enfriadores de aceite. ....	25
Figura 2-13: Filtros duplex de aceite lubricación.....	27
Figura 2-14: Filtros de aceite lubricación. ....	27
Figura 2-15: Flujo filtros de aceite lubricación. ....	28
Figura 2-16: Estanque Run-Down de sistema de lubricación. ....	30
Figura 2-17: Flujo estanque Run-Down de sistema de lubricación. ....	30
Figura 2-18: Equipo clarificador de aceite. ....	32
Figura 2-19: Sistema clarificador de aceite. ....	32
Figura 2-20: Flujo sistema clarificador de aceite. ....	33
Figura 2-21: Bombas de lubricación. ....	34
Figura 2-22: Bombas de lubricación. ....	35
Figura 2-23: Sistema aceite de control. ....	37
Figura 2-24: Flujo sistema aceite de control. ....	38
Figura 2-25: Sistema aceite de levante.....	40
Figura 2-26: Flujo sistema aceite de levante. ....	41

Figura 3-1: Componentes de la confiabilidad operacional.....	44
Figura 3-2: Causas de fallas en las industrias. (Troyer, 2010).....	45
Figura 3-3: Esquema de análisis de riesgo. ....	47
Figura 3-4: Palabras guías comunes. (Belloví, 2008) .....	50
Figura 3-5: Diagrama lógico de ejecución del análisis Hazop. (Montiel, 1999) .....	52
Figura 4-1: Diseño seccionado de sistema aceite de emergencia.....	56
Figura 4-2: Disposición de variables y palabras guías.....	61
Figura 4-3: Nodos críticos sistema aceite lubricación turbogenerador Fase I Nueva Aldea. ....	68
Figura 4-4: Sistema aceite de emergencia TG-2 Y TG-3 Nueva Aldea.....	71
Figura 4-5: Criticidad de nodos 13,14 Hazop operatividad. ....	72
Figura 4-6: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG2 Y TG3 Nueva Aldea. ....	73
Figura 4-7: Run Down Tank TG-2 Y TG-3 Nueva Aldea. ....	73
Figura 4-8: Sistema aceite de emergencia TG-1 Y TG-2 Licancel.....	74
Figura 4-9: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Licancel. ....	75
Figura 4-10: Sistema aceite de emergencia TG-2 Y TG-3 Horcones. ....	77
Figura 4-11: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG2 y TG3 Horcones.....	78
Figura 4-12: Sistema aceite de emergencia TG-4/5 Horcones.....	80
Figura 4-13: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG4/5 Horcones. ....	81
Figura 4-14: Sistema aceite de emergencia TG-6 Horcones.....	82
Figura 4-15: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG6 Horcones. ....	83
Figura 4-16: Sistema aceite de emergencia TG-1 Y TG-2 Constitución. ....	84
Figura 4-17: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Constitución.....	85
Figura 4-18: Sistema aceite de emergencia TG-1 y TG-2 Valdivia.....	87
Figura 4-19: Nodos críticos de sistema aceite emergencia TG-1 TG-2 Valdivia. ....	89
Figura 4-20: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Valdivia. ....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A. ....	12
Tabla 2-1: Valores admisibles de presión (MAN, 2003) .....	35
Tabla 2-2: Valor admisible de presión. ....	38
Tabla 2-3: Valores admisibles de presión (MAN, 2003) .....	41
Tabla 4-1: Especificaciones técnicas bomba principal. ....	54
Tabla 4-2: Especificaciones técnicas bomba Stand-By.....	54
Tabla 4-3: Especificaciones técnicas bomba principal de emergencia .....	55
Tabla 4-4: Especificaciones técnicas de filtros principales.....	55
Tabla 4-5: Nodos de estudio de sistema.....	58
Tabla 4-6: Valorización de parámetros de frecuencia.....	63
Tabla 4-7: Valorización de parámetros de consecuencia.....	64
Tabla 4-8: Valorización de parámetros de consecuencia.....	64
Tabla 4-9: Criticidad de nodos área diseño.....	65
Tabla 4-10: Criticidad de nodos área operatividad.....	67
Tabla 4-11: Desviaciones críticas como resultado de análisis.....	69
Tabla 4-12: Turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A.....	70
Tabla 4-13: Criticidad de nodos área diseño de intercambiadores de calor.....	88
Tabla 4-14: Desviaciones críticas como resultado de análisis.....	90
Tabla 4-15: Estado de nodos críticos y equipos de respaldo en sistemas de lubricación turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A.....	91

## **INTRODUCCIÓN**

Celulosa Arauco y Constitución S.A, empresa chilena dedicada al negocio forestal, maderas, paneles, celulosa y energía, generando electricidad limpia y renovable a partir de biomasa forestal, que no contribuye al calentamiento global, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Consta de 5 plantas de cogeneración eléctrica, con una capacidad instalada de 669 MW de energía eléctrica, con lo cual abastece los procesos industriales internos y a la vez contribuye a las necesidades energéticas de Chile con 180 MW, inyectados al Sistema Interconectado Central.

Tal energía es producida por alrededor de 15 turbogeneradores que se encuentran distribuidos diversamente en cada una de sus plantas. Estos deben cumplir con las exigencias establecidas de proceso para que no fallen durante un periodo continuo de tiempo, hasta que se interviene toda la planta (PGP, Parada general de planta) garantizando así la confiabilidad operacional del proceso.

En el último tiempo se han detectado graves falencias en los sistemas de turbogeneradores, específicamente detenciones inesperadas o fallas catastróficas llamadas Trip. En éstas se pierde la continuidad de la producción de energía, provocando costosas pérdidas, tanto en venta de energía, como en mantenciones. Sumado a lo anterior, se detectan fallas de tipo mecánico como las producidas en el sistema de lubricación de los cojinetes del rotor.

Una de las principales fallas analizadas en los turbogeneradores se produce por el sistema de lubricación, en donde al producirse una determinada falla, no se logra lubricar los cojinetes del rotor.

En esta Habilitación Profesional se realiza un análisis de los sistemas de lubricación, centrado en el caso crítico de falla ocurrida en turbogenerador Fase I Nueva Aldea, de tal manera de diagnosticar cuáles son las falencias que provocan tales averías, para dar soluciones efectivas.

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar los diseños y procedimientos de los sistemas de lubricación del complejo de turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución.S.A.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estudiar la falla catastrófica turbogenerador Fase I Nueva Aldea.

Estudiar los sistemas de lubricación utilizados en los turbogeneradores.

Analizar el sistema aceite lubricación de emergencia del turbogenerador Fase I Nueva Aldea.

Encontrar y estudiar una metodología de análisis para el problema.

Evaluar el estado de susceptibilidad al riesgo de los sistemas de lubricación emergencia del complejo de turbogeneradores.

Identificar el sistema de lubricación que sea capaz de aumentar la confiabilidad operacional de los turbogeneradores.

## Capítulo 1 : ANTECEDENTES GENERALES

### 1.1.- Proceso Productivo

Los principales procesos y/o actividades involucrados en la fabricación de celulosa se pueden dividir en:

- Procesos de fabricación en la línea de fibras.
- Línea de recuperación de energía.

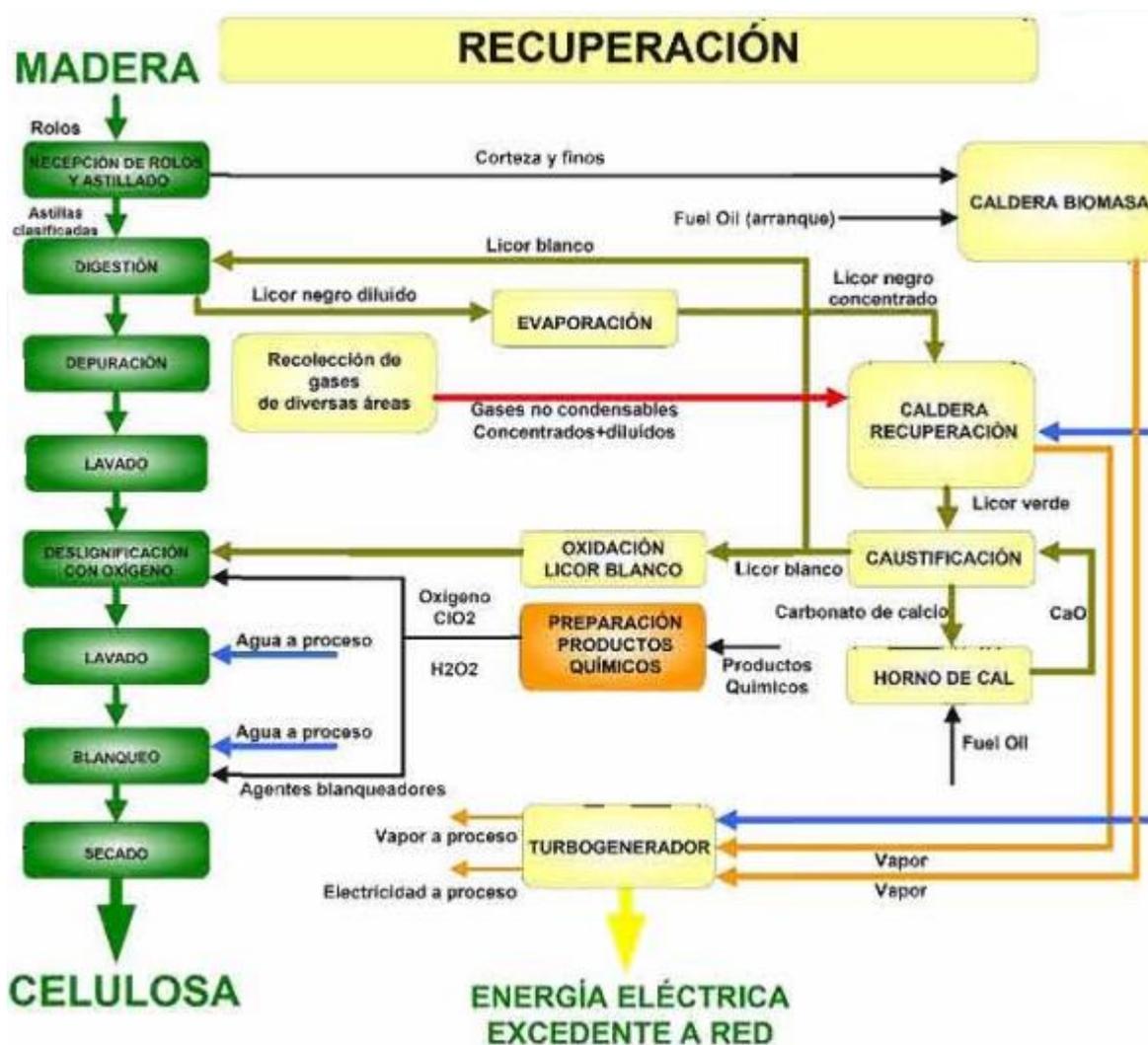


Figura 1-1: Proceso productivo Celulosa Arauco y Constitución S.A.

### **1.1.1.- Procesos de fabricación en la línea de fibras.**

El proceso comienza en el patio de maderas, donde se recepciona la materia prima, la cual es enviada directamente al proceso de descortezado, para ser convertida en astillas y conducida a la pila de almacenamiento.

Paralelamente, la corteza que se libera en el descortezador es apilada temporalmente para ser usada en la caldera de poder, que usa biomasa para cogenerar vapor y electricidad.

Luego las astillas ingresan al impregnador y digestor, donde se impregna con licor blanco, bajo presión y temperaturas, debilitando las fibras de lignina, obteniendo la liberación de la celulosa.

Luego en la etapa de lavado y blanqueo consta de dar la característica de blancura a la celulosa, de acuerdo con las exigencias del mercado. Finalmente la pulpa ingresa a la línea de terminación, donde es secada en el secador continuo, retirando el agua y obteniendo el producto final.

### **1.1.2.- Línea de recuperación de energía.**

Los compuestos químicos de la cocción son recuperados en una caldera recuperadora. Es el equipo principal del ciclo de recuperación de los reactivos. Utiliza como combustible licor negro. En este proceso de combustión se inicia la regeneración de los reactivos utilizados en la cocción de las astillas.

La energía liberada por la caldera genera el vapor necesario para calefaccionar el proceso y alimentar la planta de cogeneración, mediante un turbogenerador, produciendo incluso excedentes de energía eléctrica.

## 1.2.- Antecedentes de turbogeneradores.

Durante el proceso de recuperación de energía, un activo importante es el turbogenerador. Máquina térmica en la cual se produce un escalonamiento de velocidad producto del ingreso de vapor sobrecalentado de alta presión, proveniente de la caldera de poder o recuperadora. Este consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor, en tantos grupos de álabes como sea necesaria según su capacidad. La energía mecánica producida se proyecta mediante un reductor de velocidad o una copla directa hacia un generador que finalmente transforma esa energía mecánica en energía eléctrica.

El área de producción energética de Celulosa Arauco y Constitución S.A., cuenta con alrededor de 15 turbogeneradores instalados y distribuidos en 5 plantas de cogeneración eléctrica. Producen alrededor de 669 MW de energía, lo que logra abastecer sus procesos internos, además de un superávit de 180 MW que son inyectados al SIC.

**Tabla 1-1: Turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A.**

<b><u>HORCONES</u></b>	<b>POT. MVA. GEN.</b>	<b><u>LICANCEL</u></b>	<b>POT. MVA. GEN.</b>
TG - 2	25	TG - 1	15
TG - 3	53	TG - 2	27
TG - 4/5	30	<b><u>NUEVA ALDEA</u></b>	
TG GAS	30	TG - 2	87,5
TG - 6	38	TG - 3	87,5
<b><u>CONSTITUCIÓN</u></b>		TG – FASE I	33
TG – 1	18	<b><u>VALDIVIA</u></b>	
TG - 2	25	TG - 1	87,5
TG - 3	25	TG - 2	87,5



**Figura 1-2: Balance energético en GWh.**

### **1.3.-Antecedentes de falla por lubricación en Nueva Aldea Fase I.**

El turbogenerador fase I de marca Novo Pignone, perteneciente a Nueva Aldea, se produjo una falla de tipo catastrófica, implicando la paralización del rotor en condiciones adversas. La causa de la falla se asocia a la pérdida de la lubricación en los cojinetes.

Los antecedentes indican que el turbogenerador se encontraba trabajando normalmente. Se realizó el cambio de los elementos filtrantes en el sistema de filtros dobles, posteriormente se produjo la pérdida de la continuidad de la lubricación. Esto generó un tripeo (En la industria se le llama tripeo a la paralización repentina del equipo), paralizando el turbogenerador, provocando graves pérdidas monetarias.

Posteriormente, se llevó a cabo una intervención para repararlo, en la que todavía se trabaja. Los descansos hidrodinámicos del rotor, tanto radiales como axiales se dañaron seriamente. A grandes rasgos se utilizan estos cojinetes debido a que poseen un diseño compacto con alta capacidad de carga. Su tecnología funciona con una delgada película de aceite, que produce un fenómeno de sustentación del rotor, impidiendo así el roce de sus superficies.



**Figura 1-3: Cojinete hidrodinámico radial.**

En la Figura 1-3 y 1-4, se aprecia el daño en los cojinetes radial y axial, produciéndose desprendimiento generalizado de material blanco, asociado a altas temperaturas, debido a la fricción en seco entre la superficie del rotor y el material blanco del cojinete. En la Figura 1-5, se aprecia el daño del rotor produciendo abrasión debido a la alta temperatura sectorial.



**Figura 1-4: Cojinete hidrodinámico axial.**



**Figura 1-5: Rotor turbina.**

Al realizar la inspección al sistema de filtros doble, se notó que éstos estaban seriamente dañados por lo que la pérdida de la película hidrodinámica en los cojinetes, se asoció al colapso de los elementos filtrantes. Como se puede apreciar en la Figura 1-6.



**Figura 1-6: Elementos filtrantes.**

Actualmente se trabaja reparando el turbogenerador, y en soluciones que eviten fallas catastróficas como la ocurrida. Es por ello, que el enfoque de esta Habilitación Profesional se basa en el análisis de los sistemas de respaldo para lubricación, como también los sistemas de aceite de emergencia.

La información sobre cómo se relacionan las diferentes características técnicas previamente mencionadas se expone a continuación, con el objeto de entender las funciones de sus principales sistemas.

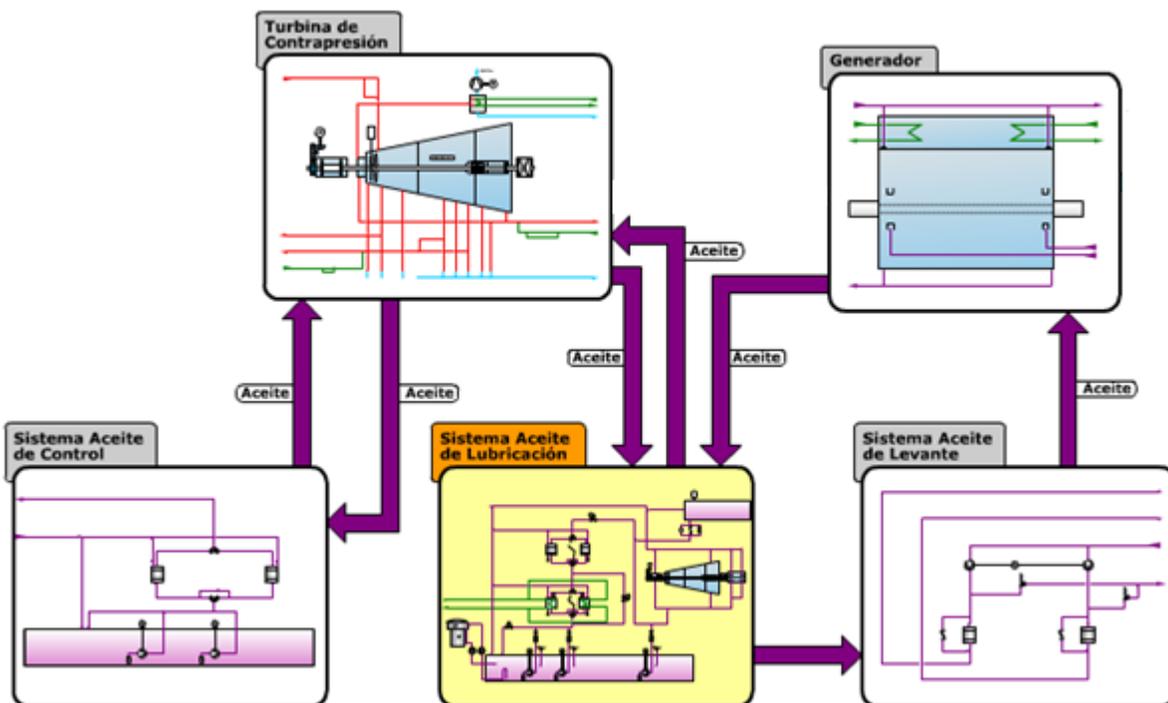
Para el funcionamiento adecuado, estos cojinetes deben ser alimentados por un sistema de lubricación forzada que incorpore el aceite en las condiciones de diseño señaladas. Tanto temperatura como presión de trabajo deben ser reguladas constantemente.

De esta manera, una vez entregada la información sobre el equipo analizado y el entorno en el cual se desempeña, se procede a entregar en el capítulo siguiente, los conceptos teóricos que se utilizarán para los análisis que se llevarán a cabo en el trabajo.

## Capítulo 2 : SISTEMAS DE LUBRICACIÓN.

La lubricación forzada en los turbogeneradores es imprescindible para mantener los cojinetes lubricados, asegurando el buen funcionamiento del rotor y evitando daños como agarrotamiento, desgaste, o excesivo calentamiento del metal antifricción.

El sistema de lubricación forzada de un turbogenerador es el conjunto de equipos físicos que cumplen el objetivo de producir la cuña hidrodinámica de aceite ( Anexo I), con el espesor indicado entre el muñón y la carcasa del cojinete, y de esta manera lograr una lubricación eficiente. Además, debe suministrar el flujo de aceite, lo suficientemente amplio para mantener la temperatura del Babbitt, metal antifricción, por debajo de los 100°C; disipando el calor que llega al cojinete por conducción térmica, por rozamiento entre película de aceite y las superficies de cojinete, además de rozamiento interno del aceite.

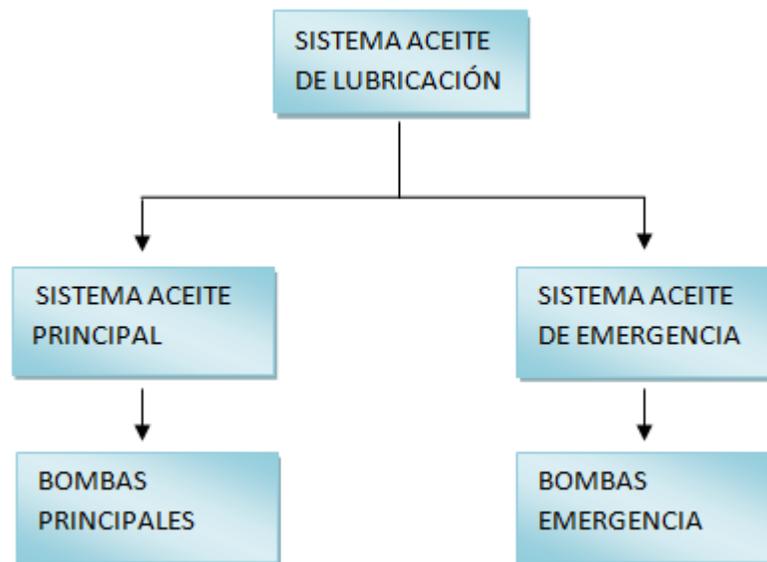


**Figura 2-1: Sistema de lubricación.**

El sistema de lubricación se divide en tres sub-sistemas. Los cuales son el sistema de aceite control, sistema aceite de lubricación y el sistema de aceite levante. Cada uno de ellos encargados de tareas específicas, para tener un mayor dominio del procedimiento.

## 2.1.- Sistema aceite de lubricación.

La función del sistema de aceite lubricación es proporcionar al caudal, la presión, la temperatura y la limpieza necesaria, para permitir una lubricación eficiente y segura en cualquier condición de funcionamiento del turbogenerador. Para cumplir con los requisitos, el sistema se subdivide en dos sub-sistemas llamados Sistema Aceite Principal y Sistema Aceite de Emergencia.

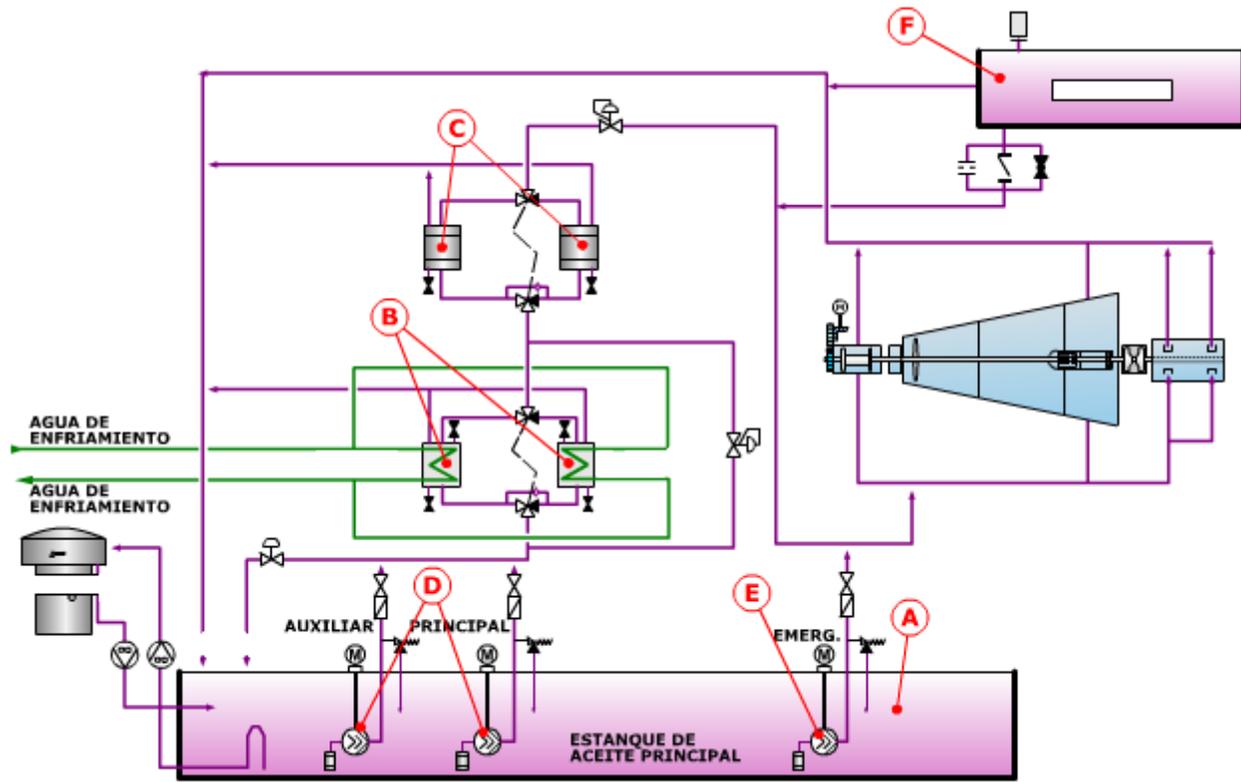


**Figura 2-2: Sub-Sistemas aceite de lubricación.**

El Sistema de Aceite Principal, corresponde a todas las unidades de equipos que permiten el funcionamiento continuo y normal de la lubricación del turbogenerador, perteneciente a la línea de conducto desde la bomba principal hasta los cojinetes. Por otra parte, el Sistema Aceite de Emergencia corresponde a todos los equipos que proporcionan un “respaldo” al sistema de lubricación principal, de tal forma de satisfacer las necesidades de lubricación. Los equipos que pertenecen a este último, parten desde la Bomba de Emergencia, siguiendo el conducto línea hasta los cojinetes.

El Sistema Aceite de Lubricación está creado con una serie de equipos que en conjunto proporcionan las condiciones de trabajo.

A continuación se muestra el Sistema Aceite de Lubricación.



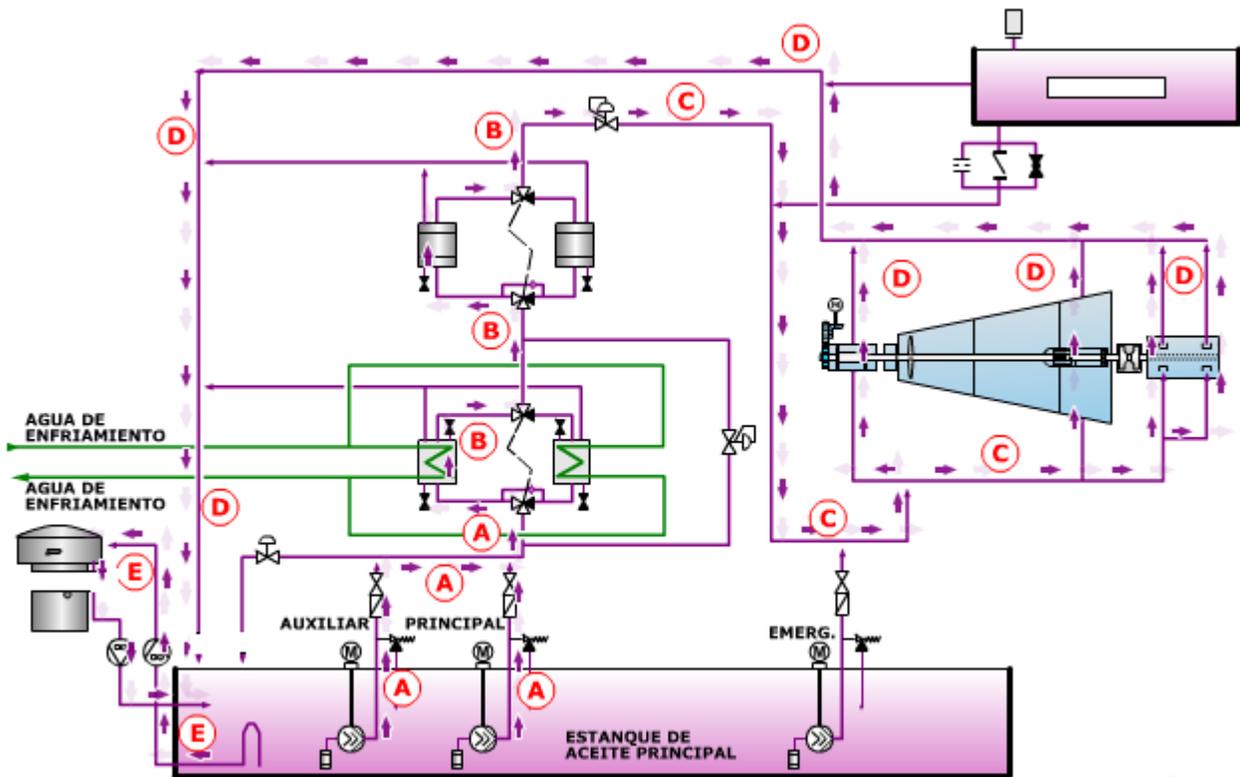
**Figura 2-3: Sistema aceite de lubricación.**

En la Figura 2-3 se muestran los componentes principales, donde (A) pertenece al estanque de aceite principal, tiene como función almacenar todo el aceite que se utilizara en los sistemas. Su capacidad varía según las necesidades de los equipos. (B) Enfriadores de aceite o intercambiadores de calor, cuya función es enfriar el aceite que fluye por el sistema. Deben mantener la temperatura en un rango mínimo de 38°C hasta 45°C. Se logra este rango de temperaturas con el uso de agua refrigerante, esta ingresa a unos 25°C, ganando temperatura hasta los 30°C a 35°C. Cabe destacar que este equipo es muy vulnerable a las condiciones ambientales. Se han registrado casos en donde se ha requerido de adaptaciones y rediseños para alcanzar dichas temperaturas en periodo de verano. (C) Filtros de aceite lubricación, encargados de purificar el aceite que se utiliza en el sistema en un rango de 20 a 30 micrones. (D) Bombas principal y auxiliar o también llamada Stand By. La bomba principal genera la presión y caudal necesario para mantener la lubricación en los cojinetes y caja reductora, mientras tanto la bomba auxiliar en algunos casos es un respaldo de emergencia. (E) Bomba de lubricación de emergencia. Esta bomba es la encargada de suministrar aceite de

emergencia desde el estanque de aceite principal, cuando las bombas principal y auxiliar se detienen o no parten por alguna falla asociada. Finalmente, (F) Estanque Run-Down de aceite, físicamente es un estanque que almacena aceite de emergencia a utilizar para lubricar los cojinetes de la turbina-generador cuando fallen las bombas principal, auxiliar y de emergencia.

Todo sistema aceite de lubricación debe contener equipos llamados de “respaldo”. Su función es asegurar una efectiva lubricación de los cojinetes, bajo cualquier condición de funcionamiento inesperada que pueda suceder.

El flujo del sistema aceite de lubricación, se representa a continuación.



**Figura 2-4: Flujo sistema aceite de lubricación.**

El flujo del proceso asociado al sistema aceite de lubricación comienza cuando el aceite (A) es suministrado desde el estanque de aceite principal al circuito de lubricación a través de las bombas de lubricación principal y auxiliar. Luego el aceite (B) fluye a través de los enfriadores y filtros. El aceite (C) se inyecta en los cojinetes de la turbina y generador, luego este aceite (D) retorna al

estanque de aceite principal. En el estanque de aceite principal, el aceite (E) es recirculado por el clarificador de aceite para eliminar las gotas de agua e impurezas.

Los principios de operación del sistema de lubricación se basan en mantener la confiabilidad del servicio de la turbina, sobre todo en los cojinetes. Para ello es esencial mantener una determinada cantidad de aceite en permanente recirculación, formando una película hidrodinámica estable, evitando así posibles trip o caídas repentinas, ocasionando serios daños en los cojinetes y el rotor.

Para el abastecimiento del aceite se dispone de bombas de corriente alterna (principal y auxiliar), pertenecientes al sistema aceite principal y una bomba de emergencia, perteneciente al sistema aceite de emergencia. Por lo general el accionamiento de esta bomba está dado por corriente continua.

La presión de aceite de lubricación es aproximadamente de 300 kPa, lo que implica que el funcionamiento correcto del abastecimiento del aceite, depende de las presiones ajustadas que inicialmente se mantengan, siempre y cuando la velocidad de giro sea la misma (Anexo I). Generalmente se presentan pequeñas diferencias debido a desplazamientos originados por la diferencia de temperaturas, por lo que controlar la temperatura del aceite dentro de los parámetros operacionales establecidos, ayudará a mantener la viscosidad del aceite en valores tales que permitan poder tener una capacidad importante de la película hidrodinámica de aceite óptima (fuerza que permite poder levantar el Rotor del casquillo) en el proceso de Lubricación.

Los descansos están lubricados con aceite a presión, el que se distribuye a los descansos por el canal de ingreso de aceite.

Luego, el aceite ingresa al interior del descanso, donde se encuentra en contacto el metal antifricción con el Rotor, a través de un canal de ingreso de aceite y al bolsillo de aceite. El aceite ingresa a la zona de contacto debido a la rotación del Rotor, el cual, al aumentar la velocidad de giro, forma una película hidrodinámica de aceite debido a la fricción y la compresión del medio lubricante. Todo esto permite levantar el Rotor, dejándolo flotar sobre la capa de Aceite (Anexo I).

De esta forma, a continuación, con el fin de especificar las condiciones de uso y diseño de estos equipos, se definirá cada componente.

### 2.1.1.-Estanque de aceite principal.

Es el recipiente donde se almacena todo el aceite que se utiliza en los sistemas de lubricación, levante y control de la turbina, además se produce una evacuación del aire que el aceite pueda contener.

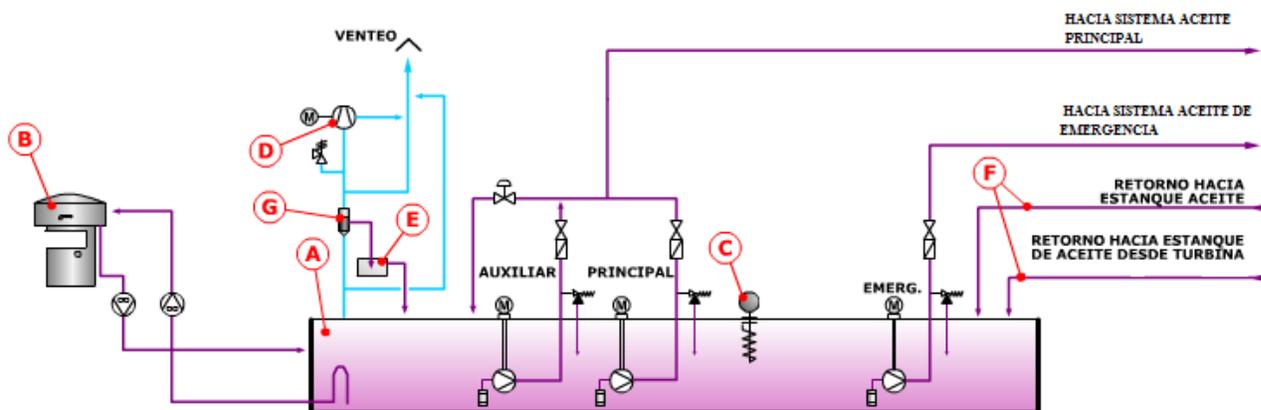


Figura 2-5: Estanque de aceite principal.

En la Figura 2-5, se muestra los componentes del estanque, en donde (A) es el estanque que almacena el volumen de aceite del sistema. Se diseña, para separar efectivamente el lodo o aire en el aceite de retorno antes que el aceite entre en la succión de las bombas. La capacidad del estanque varía según los requerimientos, entre 5000 hasta 15000 litros de aceite, inclusive, más en algunos casos.

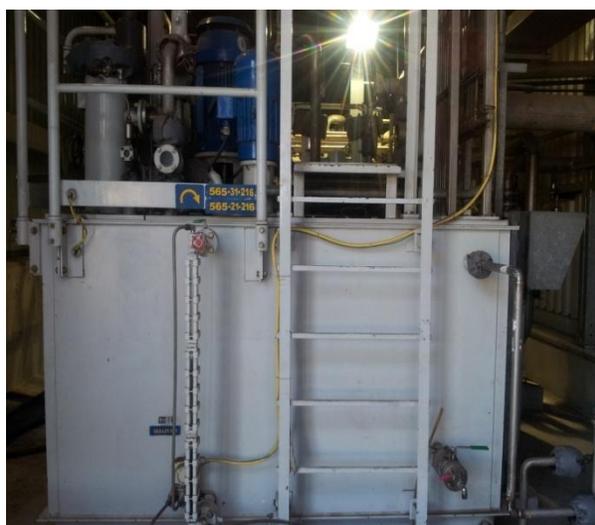


Figura 2-6: Estanque de aceite principal



Figura 2-7: Calefactor de aceite

(B) pertenece a un purificador de aceite, donde se produce la eliminación de agua e impurezas contenidas en el aceite. (C) Calefactor de aceite, es el encargado de calentar el aceite y aproximarlos a su temperatura de trabajo alrededor de 30 a 35 °C. Esta aplicación es importante en procedimientos de partida.

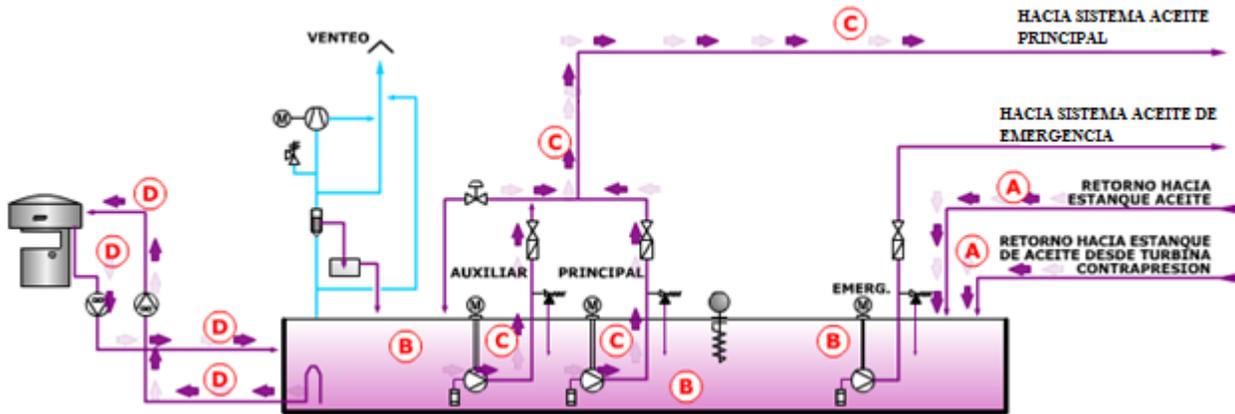
En el punto (D) se ubica el extractor de vahos, encargado de extraer los vahos de aceite y aire contenidos en el estanque de aceite. Básicamente, consiste en un extractor que agita el fluido, generando una ligera presión negativa en el interior del estanque de aceite. El extractor posee un filtro diseñado para la separación de aceite agua. (E) Indica una trampa de aceite, en donde se recolecta el aceite que se condensa en el flujo de vahos desde el estanque de aceite principal. (F) La línea de retorno de aceite, en donde ingresa aceite al estanque desde los diferentes sistemas, generalmente son de un diámetro mayor por lo que están parcialmente llenas de fluido. (G) Separador de aceite, es el encargado de separar al aceite de los vahos que se extraen del estanque de aceite principal a la atmósfera.



**Figura 2-8: Extractor de vahos.**

El estanque principal posee instrumentos necesarios para la regulación y monitoreo de condiciones tales como medidores de temperatura y niveles de aceite principal y presostatos.

El flujo del proceso asociado al estanque de aceite principal se visualiza en la siguiente Figura 2-9.



**Figura 2-9: Flujo estanque de aceite principal.**

Los principios de operación; el aceite (A) proveniente de los circuitos de lubricación, control y levante de la turbina, ingresa al estanque de aceite principal por la línea de retorno. El aceite (B) almacenado en el interior del estanque, circula de acuerdo a la dirección y disposición que tienen los tabiques que se encuentran en el interior. El aceite (C) sale por las líneas de succión de las bombas de lubricación y control, para luego circular por los diferentes sistemas. Una parte del aceite (D) del estanque principal, fluye a través del purificador de aceite para luego ser retornado al estanque nuevamente.

En general, el aceite ingresa al estanque por la diferencia de presión que existe entre el circuito y éste. Al retornar siempre es filtrado, donde se retienen partículas de suciedad que pueda traer el aceite.

Los estanques de aceite están diseñados para que exista una circulación permanente dentro de él, de modo que los tabiques ubicados en su interior, sirven para eliminar ondas y decantar sólidos permanentemente, aumentando la estabilidad de éste para permitir una buena separación del aire.

### 2.1.2.-Enfriadores de aceite.

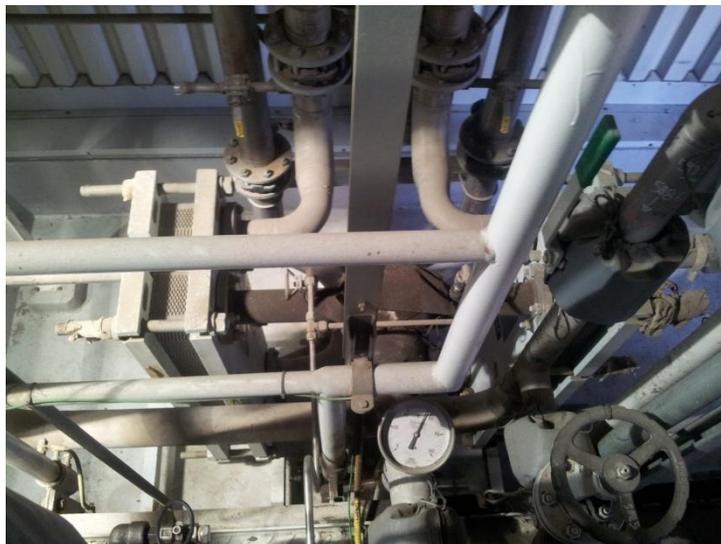


Figura 2-10: Enfriadores de aceite

Son equipos encargados de enfriar el aceite que fluye por el sistema de lubricación hacia los cojinetes, de tal forma que esté con la temperatura apropiada de funcionamiento.

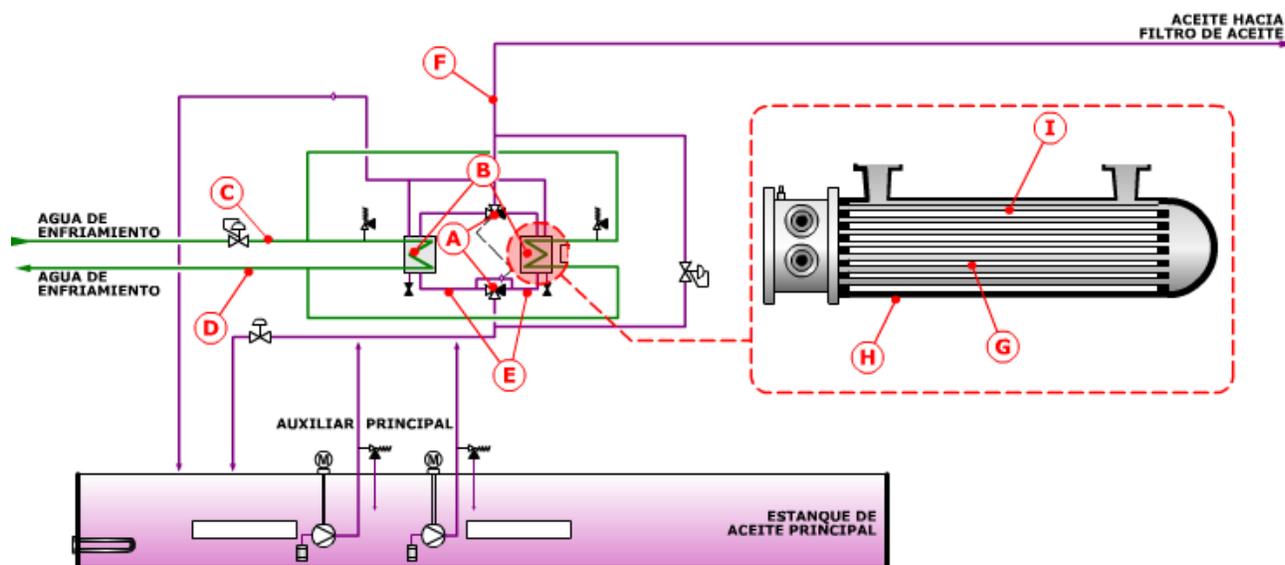


Figura 2-11: Intercambiadores de calor

Los componentes de los enfriadores se representan en la figura, (A) pertenece a la válvula tres vías, la cual permite el ingreso del aceite hacia el enfriador que está en servicio, de igual forma, permite su evacuación, además de procedimientos de mantenimiento, tales como cambio de filtros, sellos etc. Los enfriadores de aceite (B), actúan como intercambiadores de calor de contacto indirecto, donde se produce la transferencia de calor del aceite al agua por conducción, así, disminuye la temperatura de entrada de aceite a los cojinetes de la turbina y generador.

Las líneas de agua de entrada y salida (C) y (D) permiten la entrada de agua para la transferencia de calor en el intercambiador, posteriormente el agua evacua.

Con respecto al intercambiador, éste contiene tubos (G), que conducen el agua de refrigeración, además (I) son dispositivos o baffles que cambian la dirección del flujo de aceite en el interior del enfriador de aceite. (H) Actúa como un recubrimiento o envoltura exterior, que generalmente se encuentra con material aislante.

El sistema de enfriador de aceite por lo general, cuenta con instrumentación necesaria para su control, tales como medidores de presión en descarga de cada una de las bombas, auxiliar y de lubricación; medidores de temperatura, válvulas de alivio de presión en la entrada y salida de aceite al intercambiador por seguridad; válvula control de temperatura a la salida de los intercambiadores.

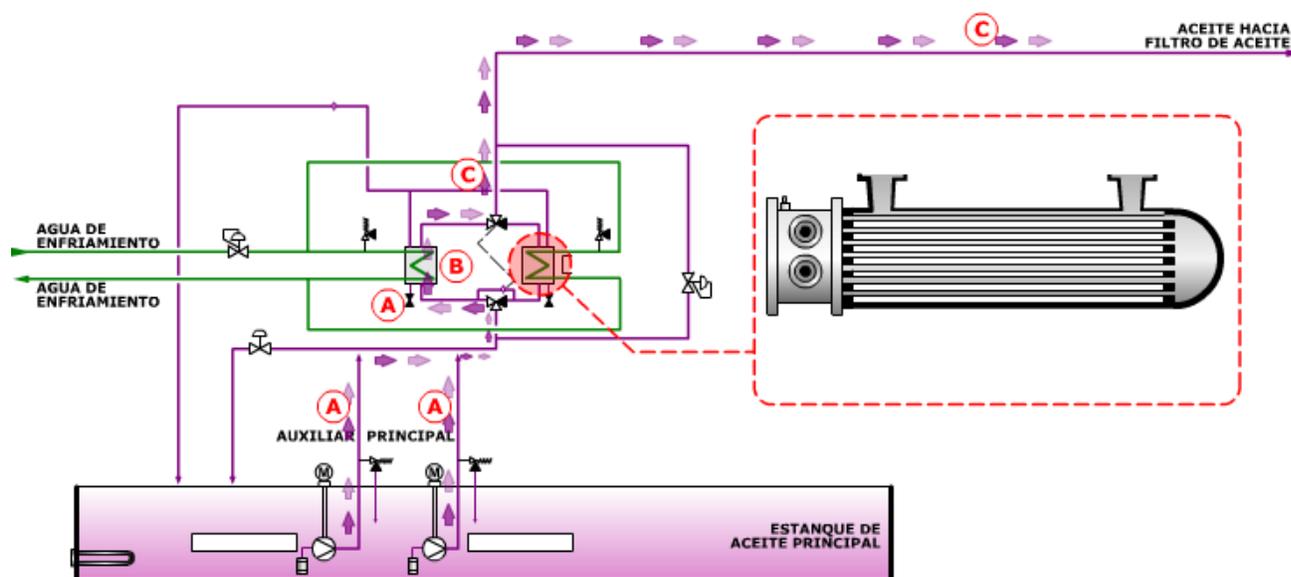


Figura 2-12: Flujo enfriadores de aceite.

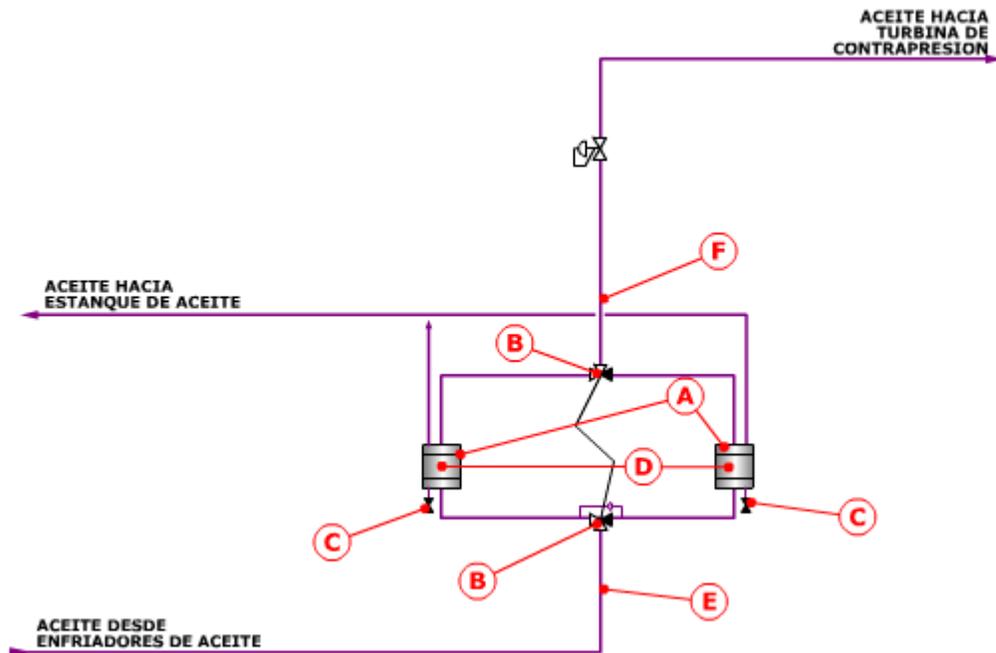
El flujo de proceso de enfriamiento se inicia cuando el aceite (A), desde el estanque de aceite principal, fluye a la válvula de tres vías para distribuirse al enfriador que está en servicio, luego el aceite (B) circula por entre los tubos y carcasa del intercambiador. Este enfriamiento, que usa como refrigerante agua de planta, evita que su temperatura aumente y pierda características de lubricante. Posteriormente el aceite (C) sale del enfriador y se dirige a la válvula de tres vías desde donde se envía a los filtros de aceite.

**2.1.3.-Filtros de aceite de lubricación.**



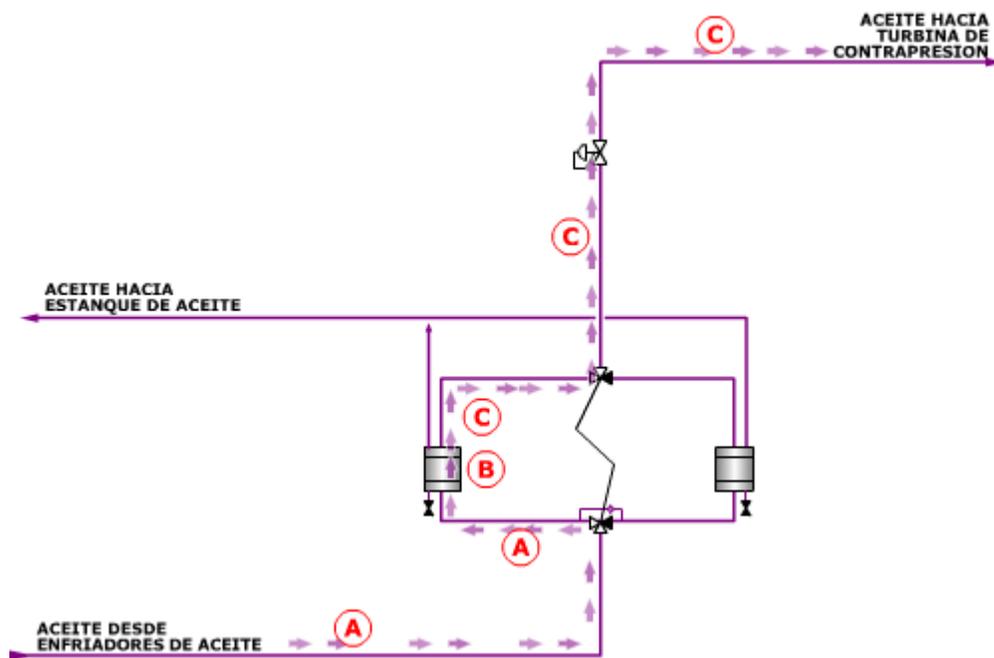
**Figura 2-13: Filtros duplex de aceite lubricación.**

Los filtros son dispositivos que permiten atrapar las partículas de suciedad, ya sean sólidas o líquidas que pudiese contener el aceite del sistema de lubricación.



**Figura 2-14: Filtros de aceite lubricación.**

El sistema de filtros, para realizar su función cuenta con (A) los filtros de lubricación, los cuales filtran el aceite evitando el ingreso de partículas sólidas a los cojinetes de la turbina y del generador, (B) las válvulas tres vías dirigen y reciben el flujo de aceite del filtro que está en servicio, mientras tanto (C) las válvulas de venteo, permiten eliminar el aire del aceite antes de enviarlo a los cojinetes. (D) pertenecen a los elementos filtrantes que generalmente son de tamices, laminillas o mallas de un ancho nominal promedio de 20 micrones y que permiten diferenciales de presión de 80kPa hasta 120 kPa. Las líneas de entrada y salida de aceite (E) y (F) permiten alimentar aceite al filtro que posteriormente evacua una vez filtrado.



**Figura 2-15: Flujo filtros de aceite lubricación.**

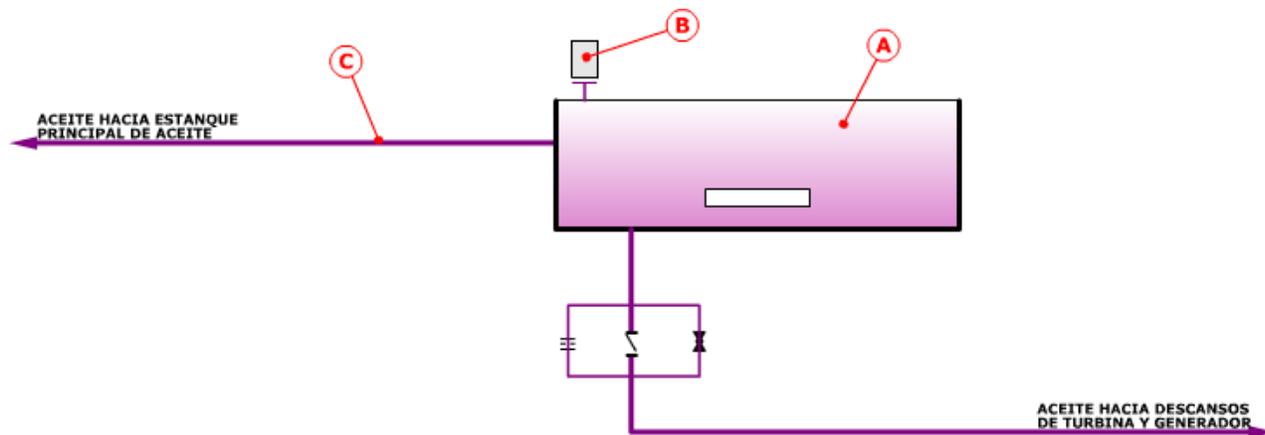
El flujo del proceso de filtrado comienza cuando el aceite (A), proveniente de los enfriadores de aceite, ingresa a los filtros de lubricación a través de la válvula tres vías que comunica el aceite con el filtro que está en servicio. Posteriormente, el aceite (B) pasa por el filtro donde se produce una separación mecánica de los sólidos. El filtro está constituido generalmente por unos tamices con un ancho de malla de 25 micrómetros que retienen a las sustancias sólidas. La fuerza física que actúa es la caída de la presión entre la entrada y la salida del filtro.

La filtración se puede mejorar aumentando la velocidad y la temperatura del aceite para bajarle la viscosidad.

Los filtros de aceite son dos, mientras uno está en servicio el otro está en stand-by. Estos filtros poseen elementos conmutadores que permiten sacar de servicio un filtro e instantáneamente poner en servicio el otro.

### 2.1.4.-Estanque Run-Down de aceite.

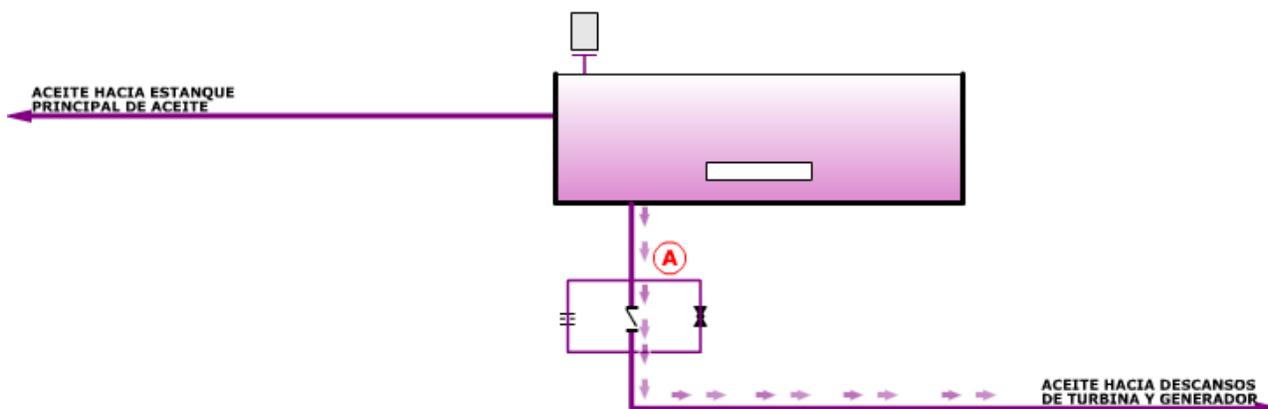
El estanque Run-Down está diseñado para ser utilizado en el sistema de lubricación de la turbina y el generador en caso de emergencia.



**Figura 2-16: Estanque Run-Down de sistema de lubricación.**

En la figura anterior, se muestra los componentes fundamentales para que cumpla sus especificaciones de diseño, (A) es el estanque físico propiamente tal, en donde es almacenado un cierto volumen de aceite. (B) pertenece al filtro respiradero, equipo encargado de no permitir una presión de vacío en estanque. (C) línea de retorno de aceite, que permite asegurar que el estanque siempre contenga el nivel normal de aceite.

Generalmente el sistema contiene instrumentación asociada para regular nivel, como una placa orificio de línea rebalse, además de switch de nivel bajo de aceite.



**Figura 2-17: Flujo estanque Run-Down de sistema de lubricación.**

El principio de operación del estanque empieza cuando ocurre una falla (no funcionan las bombas principal, auxiliar y de emergencia), en el sistema de lubricación de la turbina y el generador; producto de la baja de presión en el aceite de lubricación, se comienza a drenar el estanque Run-Down de aceite para lubricar los descansos de la turbina y el generador.

La presión del circuito de lubricación con la cual comienza el drenaje, depende de la cota de altura a la cual se encuentra, ésta puede variar entre 70kPa a 80kPa.

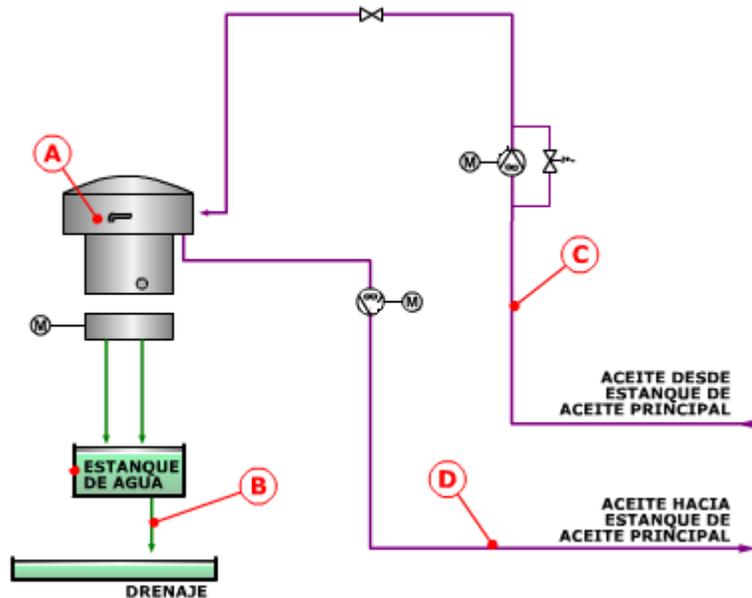
Para asegurar una pronta entrada en funcionamiento del estanque en caso de ser requerido, posee una válvula check en la línea de descarga, la cual, por diferencia de presión, se abre. Ésta se mantiene cerrada en operación por la presión propia de la línea de lubricación.

**2.1.5.-Clarificador de aceite.**



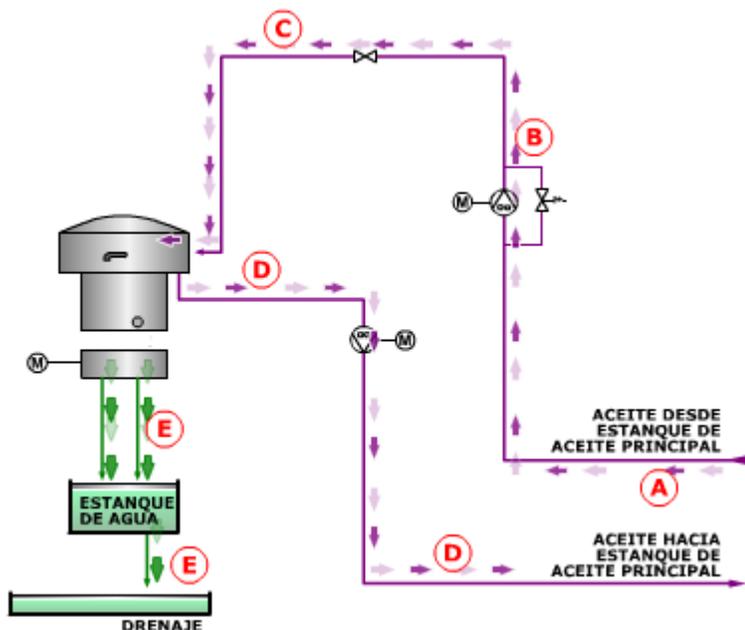
**Figura 2-18: Equipo clarificador de aceite.**

El clarificador de aceite elimina las partículas de agua e impurezas contenidas en el aceite. El proceso se fundamenta en el efecto físico de desorción, en el cual el aire caliente puede contener grandes cantidades de agua, debido a la temperatura de trabajo del aceite. El aire absorbe las partículas de agua, el que posteriormente se enfría repentinamente para condensar el agua localizada.



**Figura 2-19: Sistema clarificador de aceite.**

Dentro de los componentes comunes de este sistema. (A) Centrifuga, que elimina las gotas de agua contenidas en el aceite, (B) es la salida del agua desde el estanque. (C) y (D) pertenece a la entrada y salida de aceite.



**Figura 2-20: Flujo sistema clarificador de aceite.**

El flujo del proceso de clarificador parte cuando (A) es succionado por la bomba de aceite de desplazamiento rotatorio para distribuirlo hacia el circuito del aceite, en seguida (B) fluye hacia la válvula que distribuye el aceite a (C) hacia la centrifuga del purificador de aceite, una vez entrando a la centrifuga le extrae el agua y las impurezas al aceite (D), éste es enviado de vuelta al estanque de aceite a través de la línea. Finalmente el agua (E), que fue extraída del aceite, es enviada al estanque de agua para su posterior tratamiento.

### 2.1.6.-Bombas de aceite



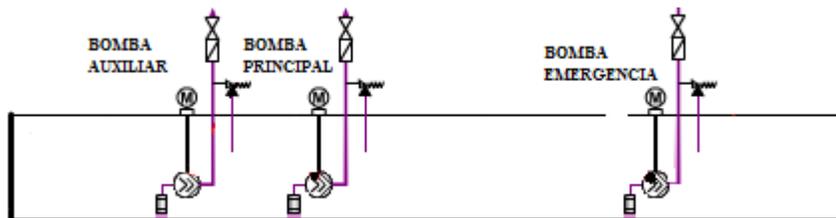
**Figura 2-21: Bombas de lubricación.**

Las bombas de aceite son encargadas de generar una lubricación forzada en las líneas de lubricación, produciendo un caudal y presión necesaria para ayudar a formar la película hidrodinámica en los cojinetes de la turbina y generador (Anexo I), como también lubricar eficientemente la caja reductora en los turbogeneradores que la poseen.

Además son elementos altamente necesarios, ya que proporcionan un respaldo ante situaciones inesperadas, tales como pérdidas de presión o fallas en las bombas principales de operación.

En la Figura 2-21 se representan tres bombas. Las bombas principal y auxiliar o también llamada Stand-By, además de una bomba de emergencia. Éstas son de tipo sumergibles, instaladas directamente en el estanque de aceite principal.

En la Figura 2-22, la bomba principal genera la presión y caudal necesario para mantener la lubricación en los cojinetes y caja reductora en estado operacional, mientras tanto la bomba auxiliar está en espera, lista para ser accionada en caso de alguna falla o pérdida de presión por el sistema de accionamiento automático.



**Figura 2-22: Bombas de lubricación.**

Si la presión en las tuberías cae por debajo de la admisible, la bomba auxiliar se acciona inmediatamente a través de un interruptor de presión.

Por otra parte, también puede ocurrir que tanto la bomba principal como auxiliar no satisfagan las presiones requeridas. En tal caso, se acciona la bomba de emergencia como respaldo.

Los límites admisibles son dados por los fabricantes o venedor de turbinas ya que dependen en cierta forma de sus condiciones de diseño. Sin embargo existen ciertos parámetros en los cuales éstos funcionan.

**Tabla 2-1: Valores admisibles de presión (MAN, 2003)**

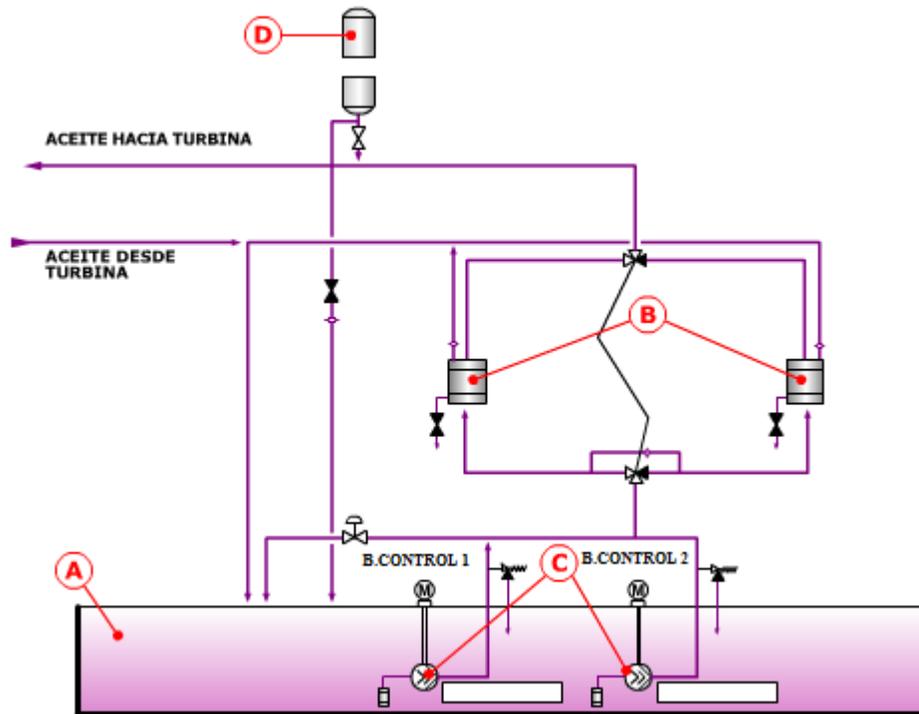
<b>&lt; 350 kPa</b>	Bomba Principal	<b>Sistema aceite lubricación</b>
<b>&lt; 200 kPa</b>	Bomba Auxiliar o Stand By	
<b>&lt; 100 kPa</b>	Bomba Emergencia	

En la Tabla 2-1, se observan los valores admisibles de funcionamiento, para los cuales las bombas se activan. Para un funcionamiento normal y óptimo de los cojinetes de la turbina, es necesaria una presión mayor a 350 kPa. Bajo ese valor, se envía un serial accionando la bomba de respaldo auxiliar, cuando la presión alcanza los 200 kPa. Así mismo, si la presión continúa disminuyendo en los cojinetes, se envía un serial, accionando inmediatamente la bomba de emergencia a los 100 kPa.

Para verificar el correcto funcionamiento del mecanismo de puesta en marcha automática de la bomba de emergencia, durante el funcionamiento de la unidad del generador de la turbina, se realiza una prueba que consiste en reducir manualmente la presión por medio de una válvula de cierre aguas arriba del interruptor de presión, esto causa que disminuya la presión en los cojinetes, en consecuencia se acciona el serial de partida de las bombas de respaldo, ya sea la bomba stand-by o la bomba de emergencia. Tras esta comprobación la válvula de cierre debe ser abierta nuevamente.

## 2.2.- Sistema aceite de control.

La función de este sistema es proporcionar el aceite necesario tanto en caudal, presión y limpieza que se requiere para realizar el accionamientos como el control de las válvulas reguladoras de cierre rápido de la turbina.



**Figura 2-23: Sistema aceite de control.**

En la Figura 2-23 se muestran los componentes asociados al sistema. (A) Estanque de aceite principal, es el recipiente donde se almacena todo el aceite que se utiliza en los sistemas de control, lubricación y levante. (B) Los filtros aceite de control, filtran el aceite que se utiliza en el sistema de control, reteniendo partículas sólidas, principalmente.

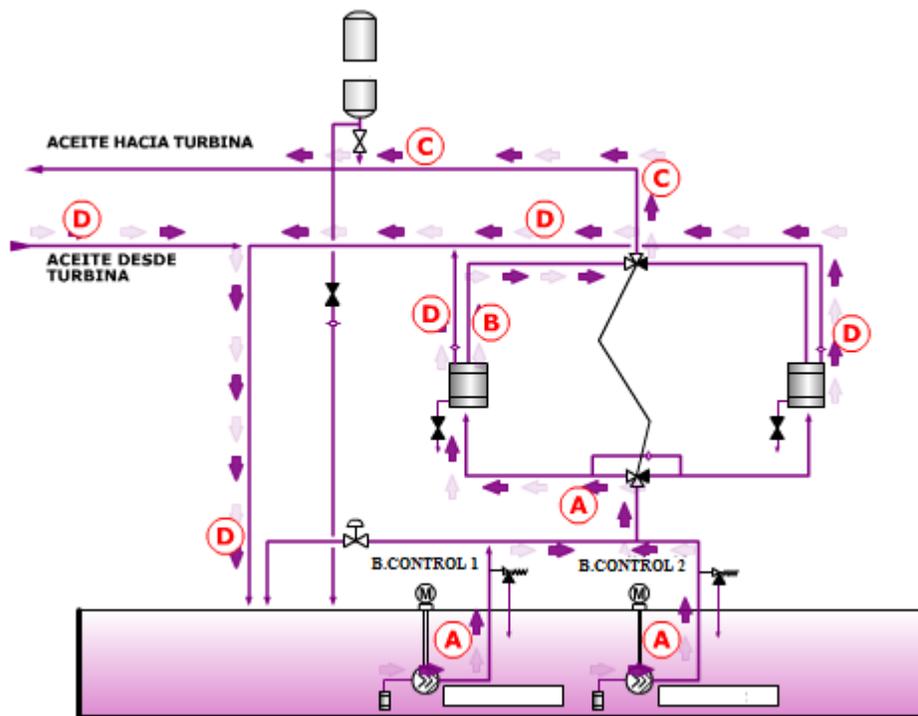
Sin embargo, en algunos diseños para ahorrar costos de montaje, se utilizan los filtros del sistema aceite de lubricación en común.

(C) Bombas aceite de control, son las encargadas de suministrar el aceite de control a todos los reguladores de presión del sistema de control de la turbina. Las bombas centrífugas son accionadas por motores de corriente alterna. Su función es suministrar a todo el conjunto de turbina, el aceite necesario para controlar el ingreso de vapor.

(D) acumulador de presión, permite proteger de manera parcial la presión del aceite de control, además de fluctuaciones de la presión.

La instrumentación necesaria para dirigir y controlar este sistema cuenta con válvulas de control de presión de aceite, éstos están localizados en el interior del acumulador.

En la Figura 2-24 se describe el flujo del proceso asociado al sistema de aceite de control.



**Figura 2-24: Flujo sistema aceite de control.**

El aceite de control es suministrado por el estanque principal, el cual por intermedio de bombas es impulsado al circuito de control (A). Tales bombas, trabajan bajo valores admisibles de presión, debido a sus requerimientos de trabajo.

**Tabla 2-2: Valor admisible de presión.**

< 4.0 MPa	Bomba Control	Sistema aceite de control
-----------	---------------	---------------------------

En la Tabla 2-2, se aprecia que la presión de trabajo normal para el sistema aceite de control se encuentra sobre 4 MPa. Mientras una bomba se encuentra en estado operacional, la otra se encuentra stand by, y entra en marcha para valores de presión bajo los 4MPa, en caso de ser requerida.

Posteriormente, el aceite (B) pasa por el filtro control que está en servicio. El aceite (C) fluye a los diferentes sistemas de control de la turbina, tales como reguladores de velocidad, válvulas de regulación de vapor y válvulas de cierre rápido. Finalmente, el aceite de control (D) es retornado al estanque de aceite principal, a través de líneas de circulación principales.

El Sistema Aceite de Control permite operar el sistema control electrohidráulico. Las Bombas Aceite de Control impulsan el aceite desde una zona de bajas presiones (estanque de aceite) hacia zonas de presiones más altas (zonas de compresiones) lo que permite, con la ayuda de algunos mecanismos reguladores, poder generar las presiones de aceite adecuadas para hacer funcionar los diferentes reguladores de control de la Turbina.

La distribución de aceite, desde los circuitos hacia los consumidores, se acciona con las válvulas solenoides. Las señales del circuito de control se transforman mediante convertidores electrohidráulicos.

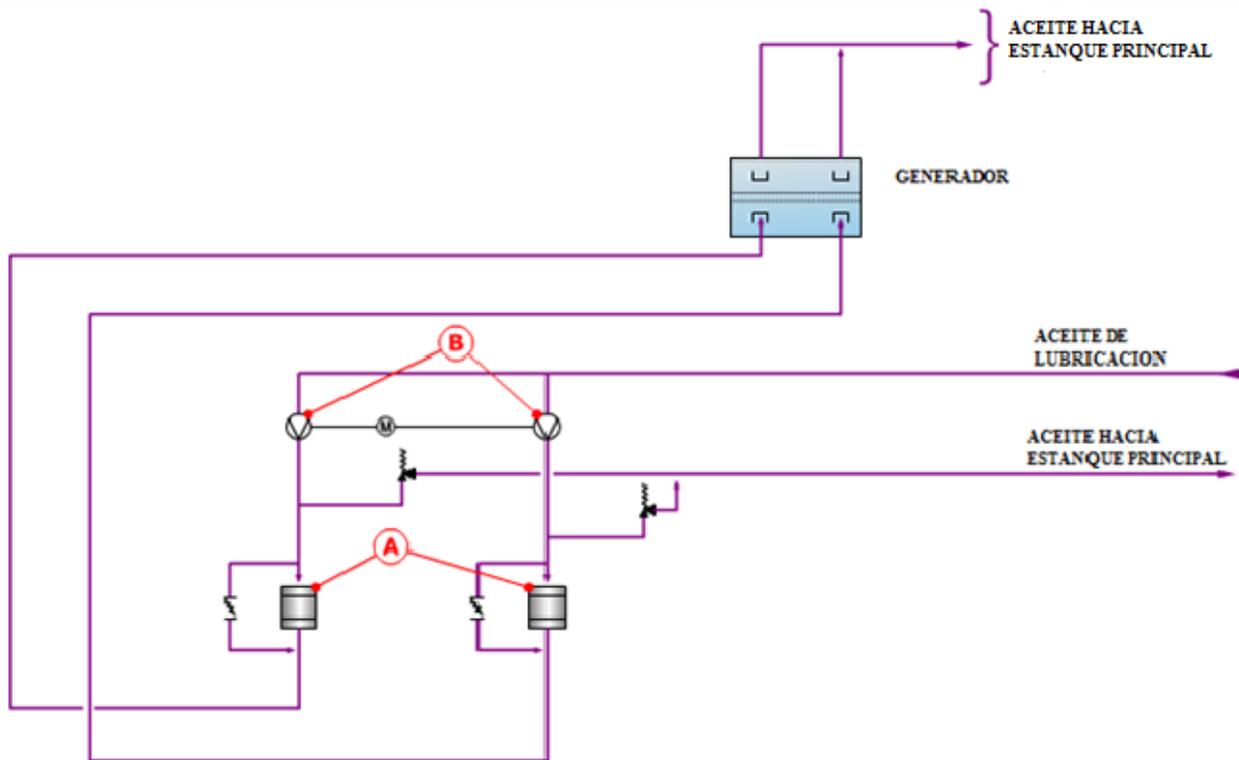
El acumulador de presión, en la unidad de suministro de aceite, equilibra las fluctuaciones de presión en el Sistema Aceite de Control y durante varios segundos se asegura que se puede completar las operaciones de conmutación. El acumulador de presión del aceite es del tipo empaletadores, en donde protege la presión del aceite de control para el convertidor que controla el flujo de vapor hacia la etapa de alta presión (aceite de control de la válvula reguladora).

El regulador de velocidad de la Turbina controla el flujo de vapor a través de las válvulas de regulación de la Turbina, de acuerdo a diversas condiciones operacionales.

Las Válvulas de Regulación reciben las señales procedentes del Sistema Aceite de Control al brazo de la válvula, elevándola o descendiéndola hasta que el caudal de vapor sea el suficiente para generar la potencia requerida.

### 2.3.- Sistema aceite de levante.

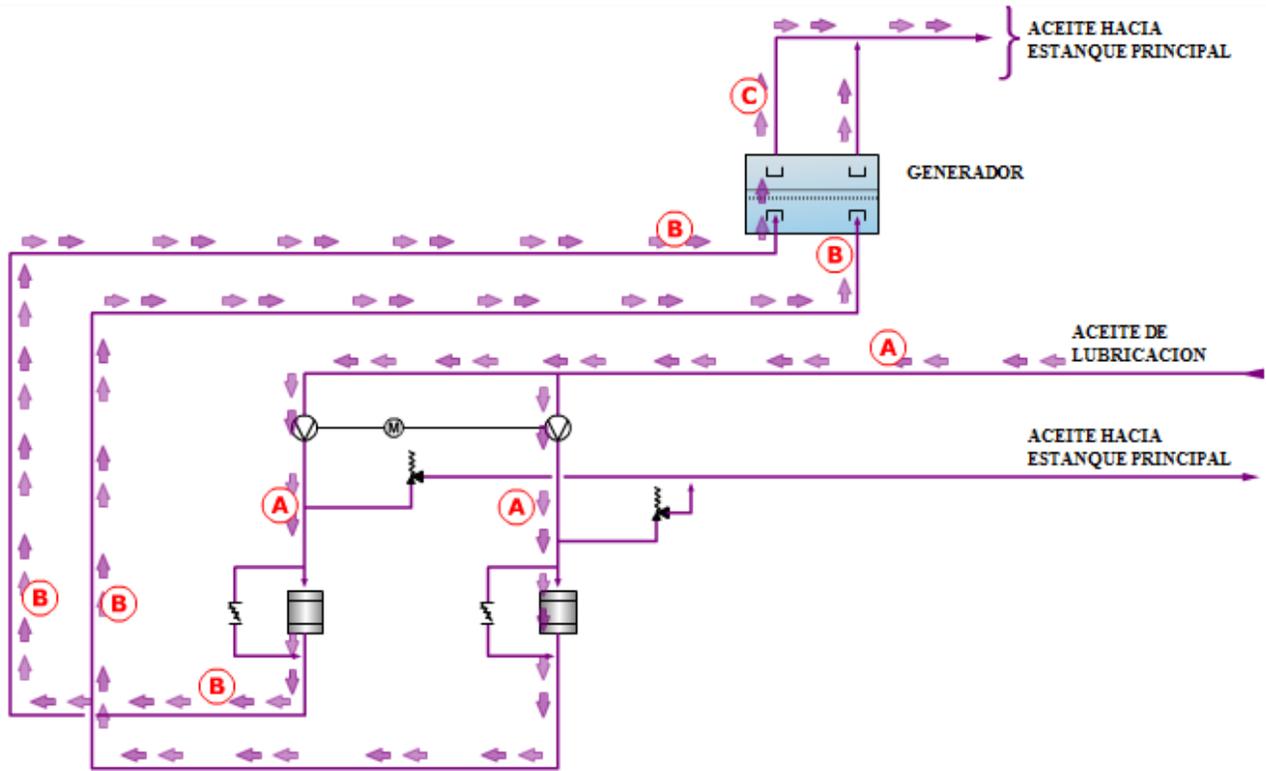
El sistema aceite de levante tiene como función proporcionar una presión de aceite adicional a cada descanso del generador, para permitir elevar el rotor con respecto al descanso y de esta forma permitir el giro sin que se produzca fricción metálica en seco, entre el rotor y el cojinete.



**Figura 2-25: Sistema aceite de levante.**

En la Figura 2-25, se muestran los componentes del sistema aceite de levante, donde (A) pertenece a los filtros aceite, que filtran el aceite que se utiliza en el circuito. Por otro lado (B) pertenece a las bombas de levante, encargadas de suministrar el aceite para mantener el eje del generador suspendido en una pequeña película de aceite en el procedimiento de partida o giro lento. Esto con el fin de evitar un daño en los descansos (Ver Anexo I) debido al peso considerable del rotor del generador.

En la Figura 2-26, se muestra el flujo del proceso asociado al sistema de levante.



**Figura 2-26: Flujo sistema aceite de levante.**

El proceso parte con la incorporación de aceite (A) suministrado desde el aceite de lubricación principal al circuito de levante por medio de las bombas de levante.

Las bombas de levante, conectadas en serie con las bombas de lubricación principal, elevan la presión del aceite a un valor admisible de trabajo. Este valor admisible muchas veces está dado por el vendedor o fabricante del sistema, el cual depende de parámetros tales como, peso de rotor de generador, tipo de cojinetes etc.

**Tabla 2-3: Valores admisibles de presión (MAN, 2003)**

<b>&lt; 9,2 MPa</b>	<b>Bomba de levante</b>	<b>Sistema aceite de levante</b>
---------------------	-------------------------	----------------------------------

Los principios de operación que radican en el sistema tienen que ser capaz de suministrar aceite a los descansos a una presión igual o mayor a 9,2 MPa cuando el generador disminuye su velocidad o cuando está detenida, ayudando a levantar el rotor con respecto a la superficie, entre el rotor y el metal antifricción del cojinete, evitando el contacto metal con metal.

El aceite ingresa al interior del cojinete, es decir, al punto en que se encuentra en contacto el metal antifricción con el rotor, a través del maguito (Ver Anexo I). El aceite ingresa a la zona de contacto, de modo que cuando aumente la velocidad de giro del rotor, se forme una película hidrodinámica de aceite debido a la fricción y compresión del medio lubricante. Finalmente el rotor flota sobre una capa de aceite en funcionamiento normal.

### Capítulo 3 : METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

En este capítulo, se definirán los conceptos asociados al mantenimiento y sus herramientas que nos permitirán realizar un análisis de nuestro caso estudio y proponer una solución a partir de ello.

#### 3.1.-Mantenimiento.

Desde el punto de vista de la ingeniería, hay dos conceptos que se utilizan el manejo de cualquier activo físico. Debe ser mantenido y si es necesario debe ser modificado.

Los diccionarios más importantes, definen “mantener” como *causar que continúe* (Oxford), o *conservar su estado existente* (Webster), o *conservar cada cosa en su ser* (Real Academia Española). Esto sugiere que “mantenimiento” significa preservar algo. Por otro lado, están de acuerdo con que modificar algo significa cambiarlo de alguna manera.

Por otra parte existe un hecho de que todos los activos físicos son puestos en funcionamiento porque alguien quiere que haga algo, en otras palabras, se espera que cumpla con su función de diseño específico. Por ende al mantener un activo, el estado que debemos preservar es aquel en el que continúe haciendo aquello que los usuarios quieren que haga.

*Mantenimiento: asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan.* (Mounbray, 2004)

Los requerimientos de los usuarios van a depender del contexto operacional. Esto lleva a la siguiente definición formal de mantenimiento basado en confiabilidad:

*Proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.* (Mounbray, 2004)

El cambio de las condiciones de la economías, la competencia, la existencia de instalaciones con mayor complejidad, el aumento del impacto y significado de los paros y las reparaciones en la interrelación de unidades productivas y de servicios, generan una mayor exigencia del concepto “ser confiable”, y la mejora de la “confiabilidad” adquiere un papel protagónico en el desempeño de empresas; que en consecuencia se obtiene tiempos de detención breves, baja cantidad de fallas y niveles de accidentes.

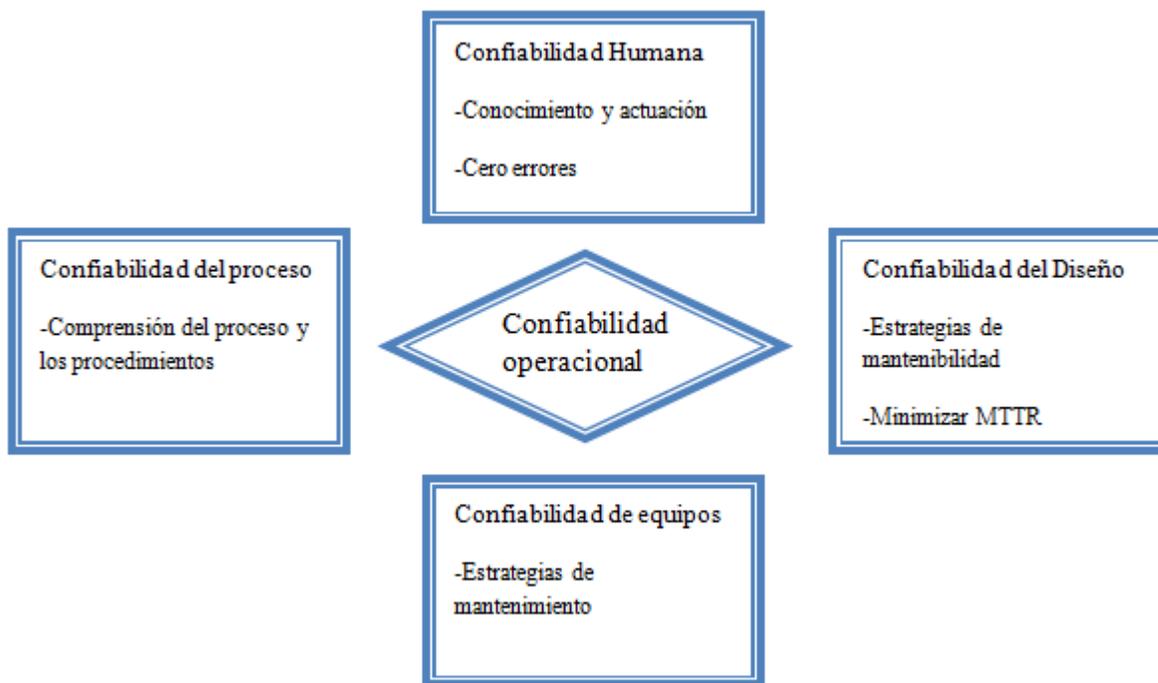
### 3.2.-Confiabilidad.

La palabra confiabilidad es muy amplia, ya que existen muchas técnicas de mejoramiento en la confiabilidad de los activos. La visión actual de este concepto es la confiabilidad operacional.

Esta se define como la capacidad de una instalación o sistema, ya sea de procesos, tecnología o personas, para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

El contexto operacional no solo afecta drásticamente las funciones y las especificaciones de funcionamiento, sino que también afecta la naturaleza de los modos de falla que pueden ocurrir y que debe hacerse para mejorarlas.

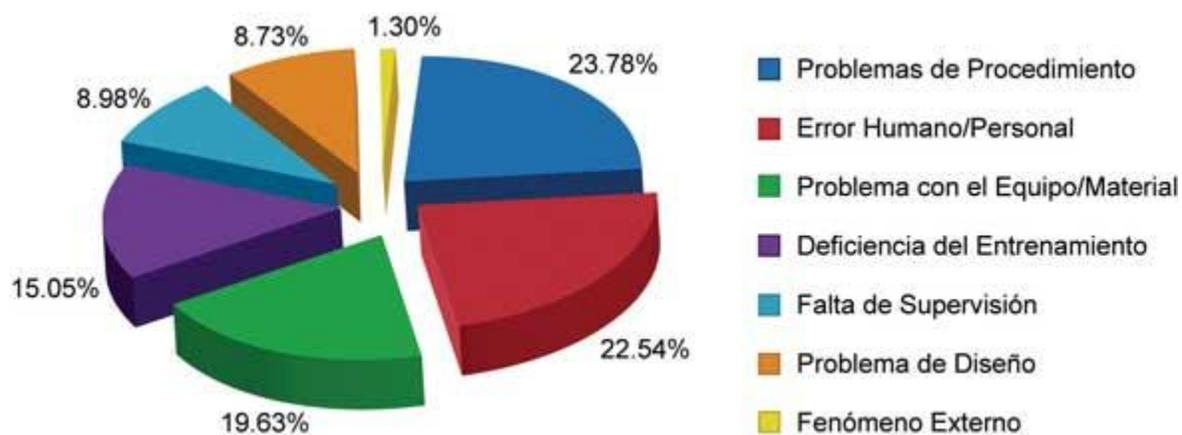
Para mejorar la confiabilidad operacional es necesario evaluar y planear la solución desde las cuatro entradas que contribuyen directamente en la operación.



**Figura 3-1: Componentes de la confiabilidad operacional.**

En la Figura 3-1, se aprecia que cualquier mejora en alguno de los aspectos entrantes, produciría de inmediato una repercusión beneficiosa en la confiabilidad operacional. Sin embargo, el déficit actual de las empresas es que trabajan cada tema de manera aislada, perdiéndose la sinergia y los beneficios para la institución. Por consiguiente, el trabajo de cada área debe ser bien definido con tareas específicas y con su misión clara.

Según un estudio estadounidense con intención de desarrollar y estandarizar un sistema de codificación, análisis y administración del comportamiento en las industrias, finalmente se denominó Sistema de Clasificación y Análisis de los Factores Humanos (SCAFH). Aunque fue desarrollado para mejorar la seguridad de la industria de la aviación, es totalmente aplicable a cualquier industria de confiabilidad crítica (incluyendo la manufactura) en donde la gente está altamente inmersa en el proceso del negocio.



**Figura 3-2: Causas de fallas en las industrias. (Troyer, 2010)**

En la Figura 3-2 se aprecia que, la gran mayoría de las fallas se producen por problemas de procedimientos y errores humanos asociados a mantenencias programadas en los activos físicos. Así mismo le siguen problemas de diseño. Este punto es de gran importancia ya que se sabe que mejorando condiciones de diseño se pueden eliminar varias fallas asociadas a errores humanos.

La confiabilidad hoy en día no significa una probabilidad matemática de falla, sino que va más allá de las estadísticas. Por lo tanto, es necesario usar diversas mediciones como indicadores fundamentales de entradas y salidas en el estudio de un proceso.

La necesidad de la confiabilidad en las instalaciones se ve afectada por factores propios de la actualidad, tales como:

- Alta presión para disminuir los costos y poder competir.
- Mayor número de funciones operacionales realizadas por equipos y máquinas.
- Mejora de estándares de rendimiento y de seguridad.
- Mayores dificultades para realizar mantenimiento, debido al aumento en la utilización de los activos.
- Tendencias a usar componentes electrónicas, neumáticas e hidráulicas, que tienen comportamientos diferentes de desgaste con relación a los componentes que fallan en función de la edad.

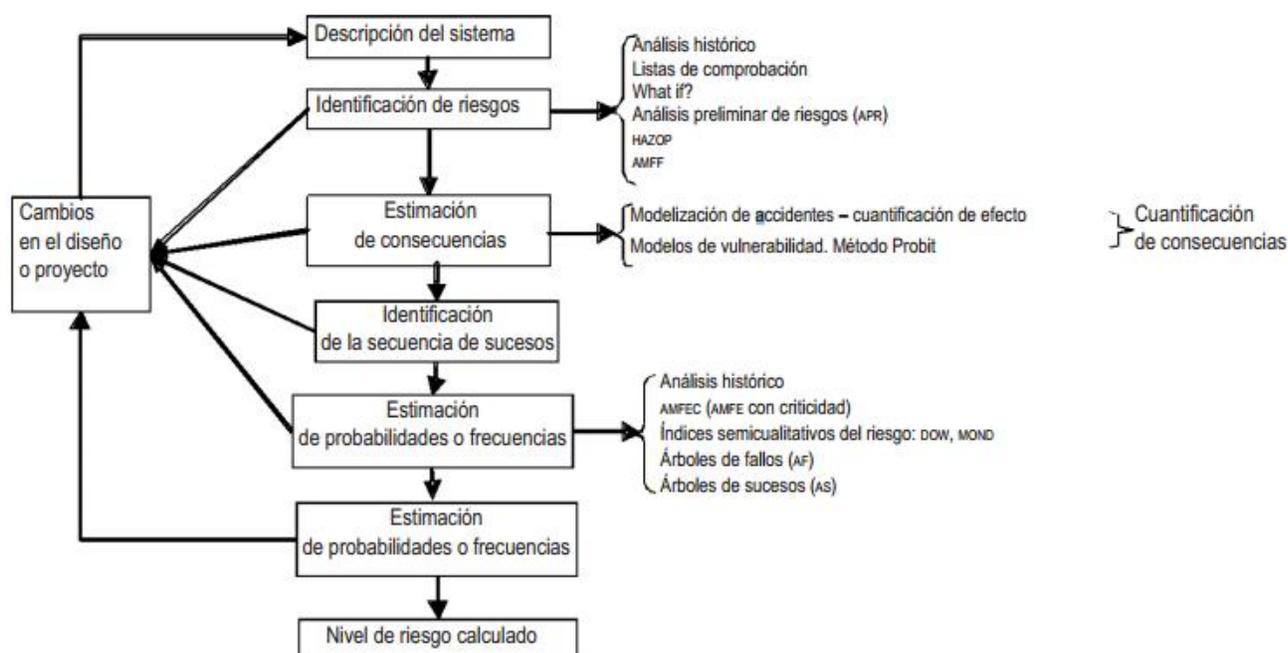
Estas tendencias tienen directas repercusiones sobre la gestión del mantenimiento y han generado procesos evolutivos en torno a la producción de estrategias, herramientas y políticas, centradas no solo en las intervenciones a equipos, sino también en una verdadera gestión que aborde, desde una perspectiva sistemática, una acertada relación con el trabajo administrativo, técnico y operativo del mantenimiento. (Pérez, 2004)

Un área de herramientas altamente aplicable a casi todo tipo de procesos y sistemas son los análisis de riesgos. Estos son estructurados desde el punto de vista lógico-deductivo de los métodos comparativos. Siguen un procedimiento lógico de deducción de fallos, errores, desviaciones en equipos, instalaciones, procesos y operaciones. Como consecuencia se obtienen determinadas soluciones para este tipo de eventos, así se logra un mejoramiento de la confiabilidad de las instalaciones, fortaleciendo las ventajas competitivas a través del proceso. (Pérez, 2004)

El objetivo del análisis de riesgos es aumentar tanto la seguridad como el servicio y rendimiento de un sistema, disminuyendo la frecuencia de los accidentes y aumentando así la confiabilidad del sistema.

El análisis de riesgos se aplica, tanto al diseño de una nueva instalación o producto como a cualquier modificación de éstos y a su construcción o reparación. Existen varios grados de análisis de riesgos como el Análisis “What if?”, Análisis funcional de operabilidad, HAZOP, Análisis de árbol de fallos, FTA, Análisis de árbol de sucesos, ETA, Análisis de modo y efecto de los fallos, FMEA.

El uso de estas herramientas varía según la complejidad y alcance del mismo, de forma general, las fases de un análisis de riesgos son las que se resumen a continuación.



**Figura 3-3: Esquema de análisis de riesgo.**

En función de las necesidades de cada caso, el análisis de riesgos que se deberá aplicar podrá ser más o menos completo. Cuanta mayor necesidad haya de reducir la probabilidad de fallo, por la magnitud de las consecuencias de éste, mayor alcance tendrá el análisis y menor será el margen de error. Existen varios grados de análisis de riesgos según la complejidad y alcance del mismo, los que se describen a continuación.

- Identificación cualitativa simple.
- Aplicación de índices de riesgos muy elementales, poco precisos, pero para los que ya se requiere alguna estimación de consecuencias y frecuencias.

- Análisis de riesgos semi-cuantitativos en los que se estiman con amplio margen de error consecuencias y frecuencias de ocurrencia.
- Análisis de riesgos completos o cuantitativos, donde se aplica algún método de análisis cualitativo seguido por un estudio cuantitativo de cada riesgo.

### **3.3.- Análisis funcional de operatividad Hazop.**

El Hazop es una metodología estandarizada de análisis sistemático, que estudia los peligros que pueden ocasionar las variabilidades de diseño y operatividad en determinados procesos o sistemas. Involucra como base los propósitos de diseño de las instalaciones nuevas o existentes. Una de sus cualidades es que puede valorar los potenciales errores de diseño o mal operación de los diferentes activos y sus consecuencias en la planta.

El objetivo de su aplicación es eliminar o minimizar hasta un nivel adecuado y aceptable las variabilidades que pudieran comprometer la confiabilidad operacional del sistema.

Se basa en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación. La técnica se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema, y consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas palabras guía.

Las premisas fundamentales del Hazop son las siguientes:

- Los sistemas funcionan bien, cuando operan de acuerdo con la intención de diseño. (Flores, 2003)
- Los riesgos y problemas operacionales son generados por las desviaciones a la intención de diseño. (Flores, 2003)

En general el Hazop es una metodología que involucra:

- Análisis de un proceso para identificar y evaluar qué puede estar mal
- Identificación de las protecciones contra los eventos
- Estimar el riesgo contenido

- Sugerir las mejoras que sean necesarias.

### **3.3.1.- Metodología.**

La metodología del análisis comprende una serie de etapas, las cuales se describen a continuación:

#### **3.3.1.1.- Descripción de la instalación.**

En primera instancia, previa recolección de todo tipo de antecedentes, necesarios para evaluar globalmente las condiciones de funcionamiento, como el diagrama de flujo de proceso, balances de materia y energía, diagramas de tubería e instrumentación, planos de localización general, hojas de datos de equipo de proceso, manuales de operación, procedimientos de trabajo, procedimientos de seguridad.

Posteriormente se deben definir las intenciones de diseño del sistema que se analizará, como también de cada uno de los activos que lo componen.

#### **3.3.1.2.- Definición del objetivo y alcance.**

Consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una determinada instalación de proceso, considerada como el área objeto de estudio, se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o líneas de proceso que corresponden a entidades funcionales propias.

#### **3.3.1.3.- Definición de los elementos críticos o nodos de estudio.**

En cada uno de estos subsistemas o líneas, se deberán identificar una serie de nodos o puntos claramente localizados en el proceso.

Cada nodo deberá ser identificado y numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido del proceso, para mejor comprensión y comodidad. La técnica Hazop se aplica a cada uno de estos puntos.

### 3.3.1.4.- Definición de las desviaciones para cada una de las variables de proceso a partir de palabras guía.

El Hazop consiste en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre la palabra guía y variable de proceso asociada, todo esto asignada a cada desviación de los nodos en estudio.

Cada nodo vendrá caracterizado por variables o parámetros de procesos, que son propiedades físicas o químicas asociadas al proceso que a su misma vez son directamente dependientes de la intención de diseño. Se incluyen aspectos generales tales como reacción presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad.

Las palabra guía se utiliza para indicar el concepto y cuantificar el intento de diseño que representan a cada uno de los nodos definidos anteriormente que entran o salen de un elemento determinado. Así se logra más fácilmente una identificación de las desviaciones. Se aplican tanto a acciones (reacciones, transferencias, etc.) como a parámetros específicos (presión, caudal, temperatura, etc.).

Palabras-Guía	SIGNIFICADO	ALGUNOS EJEMPLOS DE PROBLEMAS TÍPICOS
<b>No</b>	NEGACIÓN O AUSENCIA DE LAS ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	NO FLUJO (fallo de bomba, válvula cerrada, fuga, conducto de aspiración en vacío, obstrucción por sedimentos o cuerpos extraños, etc)
<b>Más</b>	AUMENTO O DISMINUCIÓN CUANTITATIVA. Se refiere a cantidades de medición: caudales, presión, temperatura, viscosidad, etc, o actividades: reaccionar, calentar, etc.	MAS FLUJO (aspiración presionada, válvula atascada abierta, lectura flujómetro incorrecta, etc.)
<b>Menos</b>		
<b>Mayor que o así como</b>	AUMENTO CUALITATIVO. Junto a la función deseada se realiza una actividad adicional	MAS TEMPERATURA (suciedad en intercambiador de enfriamiento, fallos del regulador de temperatura, etc)
<b>Parte de</b>	DISMINUCIÓN CUALITATIVA. Se realiza solamente una parte de la función deseada	PRESENCIA DE IMPUREZAS (entrada de contaminantes como el agua, aceites, productos de corrosión, fallos de aislamientos, etc)
<b>Inverso</b>	OPOSICIÓN A LA FUNCIÓN DESEADA. Utilizable preferentemente a actividades tales como flujo de retroceso, inversión de racción química, etc)	FLUJO DE RETORNO (bomba invertida, comunicación con sobrepresión, tallo de bomba, fallo de válvula antiretroceso, etc)
<b>De otra forma</b>	SUSTITUCIÓN COMPLETA DE LA FUNCION DESEADA. Sucede algo totalmente diferente a las finalidades originales	OTRAS ACTIVIDADES DISTINTAS A LA OPERACIÓN NORMAL (arranques y paradas en la instalación, fallos de energía o servicios, emisiones, incompatibilidades, operaciones de limpieza y mantenimiento, tomas de muestras, etc)

Figura 3-4: Palabras guías comunes. (Belloví, 2008)

Las desviaciones son cambios con respecto a la intención del diseño original, las cuales son descubiertas a través de la aplicación sistemática de las palabras guías en conjunto con las variables del proceso.

### **3.3.1.5.- Identificar las posibles causas de cada desviación.**

Las causas son las razones por las cuales las desviaciones pueden ocurrir. Una vez que se ha determinado que una desviación tiene una causa de peso, puede ser tratada como una desviación significativa. Estas fallas pueden ser fallas de equipo, errores humanos inesperados, estados de proceso etc.

### **3.3.1.6.- Establecer las consecuencias posibles de la desviación.**

Las consecuencias son el resultado de las desviaciones, tienen la particularidad de comprometer grados de consecuencia. Las consecuencias que representan riesgos de tipo menores o medianos, se considerará al paso siguiente. En el caso de que las consecuencias representen riesgos mayores, se considerará en el siguiente paso un análisis mediante un método más detallado.

### **3.3.1.7.- Determinar medidas correctoras.**

Las medidas correctoras son sugerencias en el caso que suceda la desviación. Por lo general se enfocan en cambios de diseño, cambios conductuales, o áreas de estudio posterior.

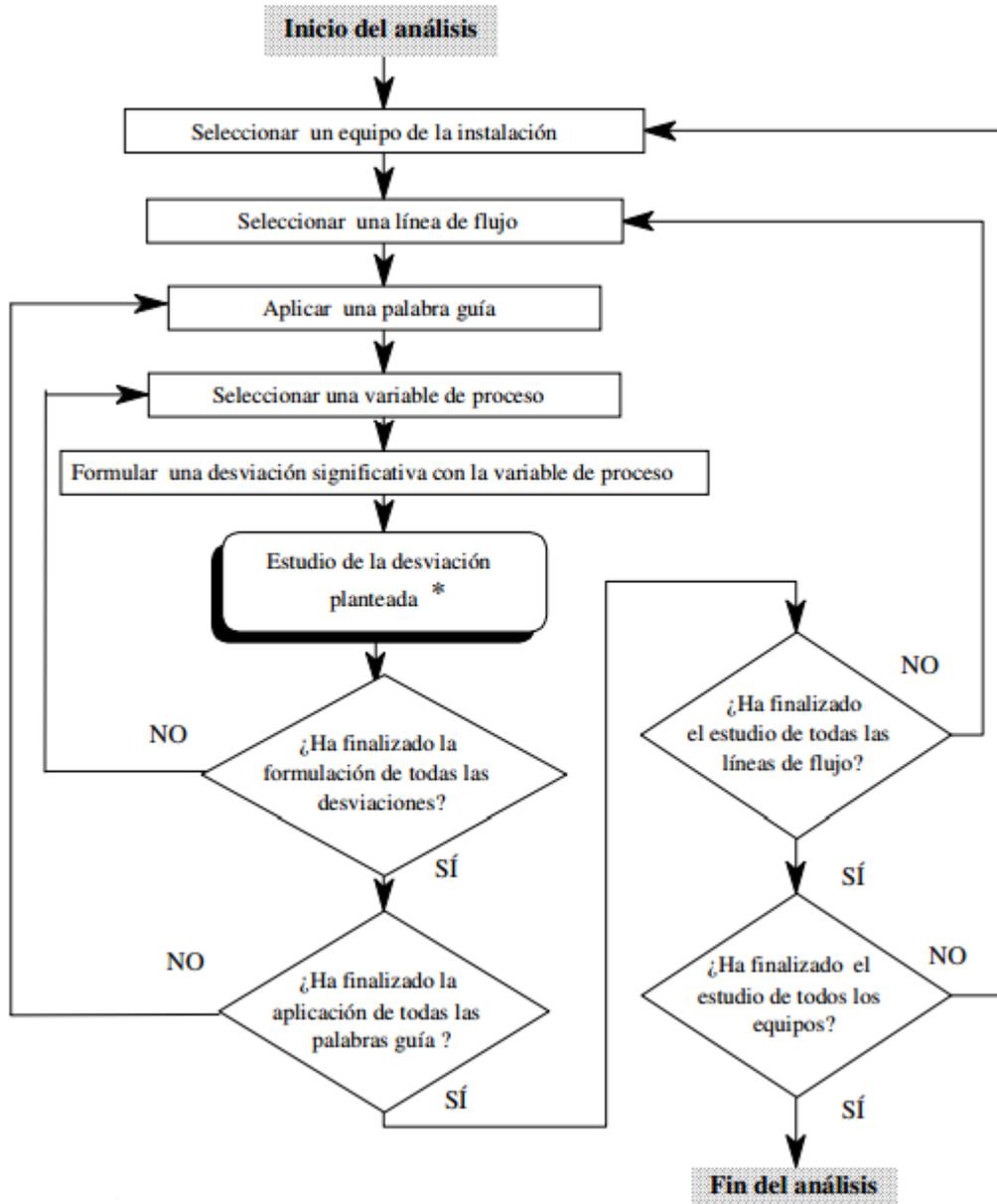


Figura 3-5: Diagrama lógico de ejecución del análisis Hazop. (Montiel, 1999)

En la Figura 3-5 se describe el flujo lógico de procedimiento para aplicar el Hazop a un sistema en cualquier industria.

## **Capítulo 4 : DESARROLLO DE METODOLOGÍA.**

El desarrollo del trabajo consistirá en realizar en primera instancia un análisis Hazop al sistema aceite de lubricación del turbogenerador Fase I Nueva Aldea, poniendo énfasis en el sistema aceite de emergencia. Ésto a objetivo de obtener los principales puntos o nodos críticos del sistema, de acuerdo a parámetros de diseño y procedimientos de mantención.

Luego, definidos los nodos críticos, se aplicarán a los siguientes sistemas de lubricación de cada turbogenerador perteneciente a cada planta. Donde se analizarán detalladamente las condiciones de diseño de cada uno.

Finalmente se desarrollará un estatus general de la condición de los sistemas de lubricación y su comparación con las condiciones ideales de diseño y operatividad, obteniendo un diseño mejorado y aceptable, además de estrategias de mantenimiento que deberían realizarse a cada nodo de falla asociados a las detenciones de aquellos sistemas.

Considerando la metodología Hazop descrita en el capítulo anterior, a continuación se desarrollará y aplicará al sistema aceite de lubricación forzada del turbogenerador Fase I Nueva Aldea.

#### 4.1.- Descripción de la instalación.

La instalación del sistema aceite de lubricación actual se compone de:

- Filtro succión estándar.
- Conducto aceite lubricación de emergencia.
- Bomba tornillo Principal.

**Tabla 4-1: Especificaciones técnicas bomba principal.**

<b>Bomba Principal</b>		
<b>Tag</b>	465 21 102	
<b>Modelo</b>	sng 2200-42	
<b>Tipo</b>	Tornillo horizontal	
<b>Flujo Volumétrico</b>	1800	L/min
<b>Entrega de presión</b>	1.1	MPa
<b>T° de trabajo</b>	65+-70	°C
<b>Velocidad</b>	1500	rpm
<b>Potencia absorbida máx.</b>	45,4	kW

- Bomba tornillo Stand-By.

**Tabla 4-2: Especificaciones técnicas bomba Stand-By.**

<b>Bomba Stand By</b>		
<b>Tag</b>	465 21 100	
<b>Modelo</b>	SNTE 1700 ER 46	
<b>Tipo</b>	Tornillo vertical	
<b>Flujo Volumétrico</b>	1680	L/min
<b>Entrega de presión</b>	1	MPa
<b>T° de trabajo</b>	10° mínimo-70°normal- 85° máximo	°C
<b>Velocidad</b>	1475	rpm
<b>Potencia absorbida máx.</b>	56	kW

- Bomba tornillo vertical de Emergencia.

**Tabla 4-3: Especificaciones técnicas bomba principal de emergencia**

<b>Bomba De Emergencia</b>		
<b>Tag</b>	465 21 104	
<b>Modelo</b>	ruc 440 r 40	
<b>Tipo</b>	tornillo vertical	
<b>Flujo Volumétrico</b>	675	L/min
<b>Entrega de presión</b>	100	kPa
<b>T° de trabajo</b>	10° mínimo-70° normal- 85° máximo	°C
<b>velocidad</b>	2900	rpm
<b>Potencia absorbida máx.</b>	10,5	kW

- Motor corriente alterna, accionado por un generador diesel.
- Conducto bomba-filtros de emergencia, donde para asegurar el sentido de flujo contiene una válvula direccional, además de una válvula de bola que para cerrar o abrir el paso.
- Dos conductos de retorno de aceite de emergencia. La primera consta de una válvula alivio de seguridad con un medidor de flujo. La segunda consta de válvula de bola manual con medidor de flujo.
- Sistema de filtros dobles de aceite, regulados tanto a la entrada como a la salida por dos válvulas tres vías.

**Tabla 4-4: Especificaciones técnicas de filtros principales.**

<b>Filtro De Emergencia</b>		
<b>Tag</b>	465-59-102/132	
<b>Modelo</b>	D6PW4FS	
<b>Presión de operación diseño</b>	1.4/1.0	MPa
<b>Temperatura de operación diseño</b>	80/50	°C
<b>Filtración nominal</b>	0.25	µm
<b>Presión mínima clean/dirty</b>	35/150	KPa

- Medidores de presión, temperatura y densidad entre entrada y salida de los filtros dobles.
- Visor de aceite que permite un cambio seguro de elemento filtrante.
- Línea de cañería filtros-descansos. Consta de dos válvulas de globo en serie además de una válvula genérica con diafragma.

A continuación se representa la distribución y diseño del sistema aceite de lubricación, teniendo énfasis en la línea de emergencia.

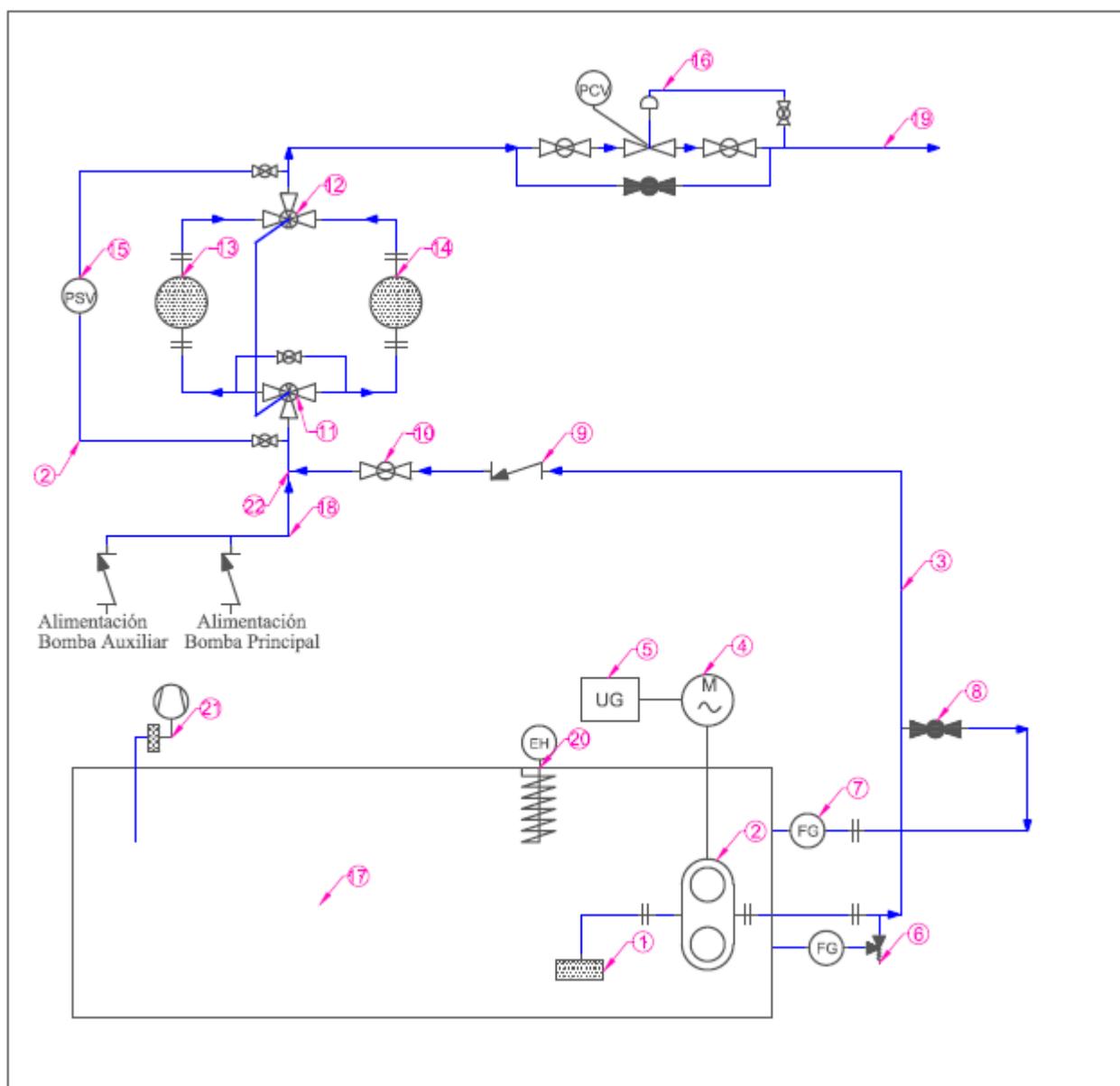


Figura 4-1: Diseño seccionado de sistema aceite de emergencia.

El funcionamiento básico del sub-sistema aceite de emergencia se basa en la activación inmediata, al detectarse variaciones de presión significativas en los cojinetes del turbogenerador. Estas variaciones pueden ser provocadas netamente por la disminución de presión producto de que tanto la bomba principal como la auxiliar quedaron fuera de servicio. El sistema de emergencia iniciándose, succiona aceite filtrado del estanque principal a través de su bomba de tornillo. La presión y flujo de aceite impulsado es regulado por las válvulas alivio de seguridad, permitiendo unificar principalmente la presión a la entrada de los filtros dobles. En los filtros dobles el aceite es filtrado, extrayendo impurezas sólidas principalmente, en un rango de 20 micrones. Inmediatamente después de los filtros, el aceite es regulado nuevamente por una serie de válvulas para finalmente ser incorporado a los cojinetes de la turbina y generador, como también a la caja reductora.

#### 4.2.- Definición de nodos o elementos críticos.

A continuación se definen los nodos de estudio en el sistema aceite lubricación, además de especificar sus funciones de diseño. Físicamente se puede ver su distribución en la Figura 4-1.

**Tabla 4-5: Nodos de estudio de sistema.**

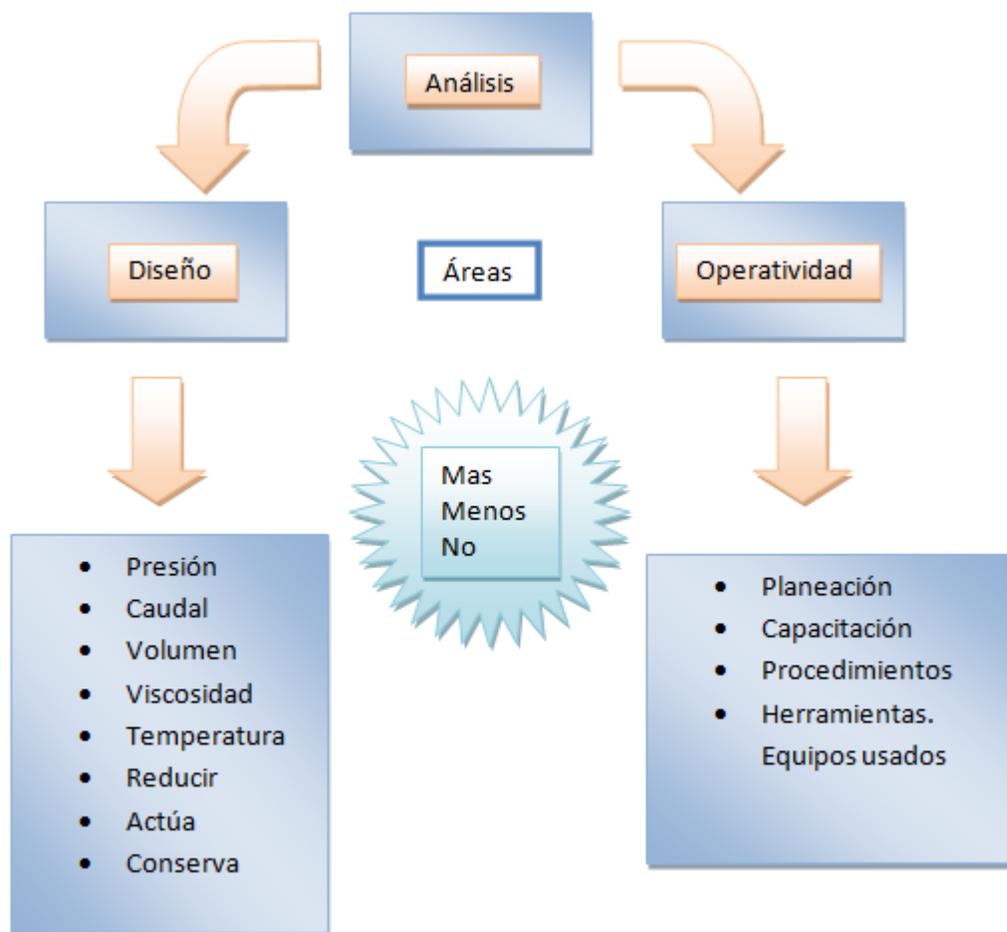
<b>Nodo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Función (Intención de diseño).</b>
<b>1</b>	Filtro succión estándar	Eliminar contaminación de partículas sólidas de mayor tamaño, sobre 100 micrones.
<b>2</b>	Bomba tornillo vertical	Impulsar un caudal de aceite 675 l/min a la presión de 100 kPa para lubricar los descansos de turbina, generador y caja reductora en caso de emergencia.
<b>3</b>	Conducto aceite lubricación de emergencia	Transportar el fluido desde la bomba (2) bajo las condiciones (Q=675l/min y P= 100kPa) de hasta los filtros dúplex (13) (14).
<b>4</b>	Motor AC	Proporcionar energía de rotación para accionar la bomba (2)
<b>5</b>	Generador diesel	Proporcionar energía eléctrica para accionar el motor AC (4)
<b>6</b>	Válvula alivio seguridad	Regular presión de fluido suministrada al sistema.
<b>7</b>	Medidor flujo	Evaluar la condición de caudal suministrada al sistema.
<b>8</b>	Válvula de globo retorno	Regula, impide o permite el paso de fluido hacia el conducto de retorno, se encuentra generalmente cerrada.
<b>9</b>	Válvulas unidireccional anti retorno	Las válvulas anti retorno son ampliamente utilizadas en tuberías conectadas a sistemas de bombeo para evitar golpes de ariete, principalmente en la línea de descarga de la bomba.

<b>10</b>	Válvula de globo	Regula, impide o permite el paso de fluido hacia el conducto de lubricación principal. Se encuentra generalmente abierta.
<b>11</b>	Válvula tres vías entrada	Impide o permite el paso de fluido teniendo tres diferentes posiciones de trabajo. Así se puede incorporar o retirar los elementos filtrantes del circuito, permitiendo una secuencia de flujo de aceite que asegura la continuidad.
<b>12</b>	Válvula tres vías salida	Impide o permite el paso de fluido teniendo tres diferentes o posiciones de trabajo, así se puede incorporar o retirar los elementos filtrantes del circuito, permitiendo una secuencia de flujo de aceite asegurando la continuidad.
<b>13</b>	Filtro	Purificar el aceite del conducto aceite lubricación principal (18) y conducto aceite lubricación de emergencia (3).
<b>14</b>	Filtro Stand-By	Purificar el aceite del conducto aceite lubricación principal (18) y conducto aceite lubricación de emergencia (3) luego que el medidor de diferencial de presión indique sobre 120 kPa.
<b>15</b>	Manómetro diferencial multivariable	Indicar diferencia de presión en filtros operativos para que se realice la operación de cambio de elemento filtrante.
<b>16</b>	Conjunto válvulas de globo y diafragma	Regular automáticamente las necesidades del sistema, considerando parámetros de flujo, presión y viscosidad. Indicar alerta inmediata si se manifiestan alteraciones en fluido.

17	Estanque principal	Almacenar y contener el mínimo de aceite para que el sistema de lubricación funcione correctamente.
18	Conducto aceite lubricación principal	Transportar el fluido bajo las condiciones (P= 1.1 MPa y Q= 1800 l/min) desde el "sistema aceite lubricación principal" hasta los filtros dúplex (13) y (14).
19	Conducto aceite lubricación hacia descansos y reductor	Transportar el fluido desde los filtros dúplex (13) (14) hasta los cojinetes de turbina generador y caja reductora.
20	Calentador eléctrico inmerso	Aumentar el gradiente de temperatura del aceite a un mínimo de 30°C.
21	Extractor de Vahos y Venteo	Separar vahos producto del vapor de agua y el continuo movimiento del aceite, condensándose y recolectado en la trampa.
22	Empalme conductos (3) y (18)	Unificar y juntar los flujos de aceite hacia provenientes del conducto aceite lubricación principal y el conducto aceite lubricación emergencia.

### 4.3.- Definición de variables y palabras guías.

Para aplicar eficientemente la metodología Hazop al sistema de lubricación, se debió subdividir el análisis en dos áreas de estudio.



**Figura 4-2: Disposición de variables y palabras guías.**

En la Figura 4-2, el área de diseño, contempla un análisis de cada nodo con respecto a variables dadas por el fabricante, como también relacionadas con las funcionalidades de cada nodo. Las variables a analizar son presión, caudal, volumen, viscosidad, temperatura, reducir, actuar, conserva.

El área de operatividad considera un análisis de nodos claves considerados con altos índices de intervenciones de mantención, tanto en funcionamiento como en paradas de planta programadas. Las variables evaluadas son Planeación, Capacitación, Procedimientos, Hrtas equipos usados.

Las palabras guías utilizadas fueron “más, menos y no” representando una señal o síntoma de desviación, tanto de diseño como de operatividad, con respecto a las variables anteriormente mencionadas.

#### **4.4.- Análisis área de diseño y operatividad.**

Para el análisis se consideró el uso de desviaciones para cada nodo, llamadas ID (Identificación de desviación). Tales fueron obtenidas de modos de falla comunes, con el apoyo de la norma ISO 14224 de estandarización. Posteriormente se avaluó las correspondientes causas de las desviaciones, pertenecientes a los mecanismos de falla. Así mismo las consecuencias y sus medidas correctoras.

El resultado del análisis Hazop se muestra en el Anexo IV. Donde se evaluó la condición de cada nodo de estudio considerando parámetros de diseño y operatividad, arrojando un total de 34 desviaciones para el análisis del área diseño y 12 desviaciones para el análisis del área operatividad.

Luego para evaluar la severidad de cada desviación o ID, se aplicó la metodología de evaluación de riesgos, de tal manera de encontrar los nodos que posean una mayor criticidad desde el punto de vista diseño como operatividad.

#### 4.6.- Evaluación de la magnitud del riesgo o criticidad del sistema.

Para evaluar la criticidad del sistema aceite de lubricación analizado por el método Hazop (Anexo IV), se empleó un método de evaluación de riesgo.

Se tiene por definición que la criticidad es igual al producto de la frecuencia por la consecuencia.

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * \text{Consecuencia}$$

De este modo, para realizar esta evaluación se definieron los siguientes parámetros de frecuencia y consecuencia para las áreas de diseño y operatividad.

##### 4.6.1.- Parámetros utilizados.

Para valorizar la información obtenida del desarrollo método Hazop, se requirió definir diferentes parámetros para cada área analizada, tanto diseño como operatividad, ya que sus enfoques son diferentes.

- Para el área de diseño se definieron las siguientes tablas de frecuencia y consecuencia:  
La Tabla 4-6 considera valores válidos para el análisis área de diseño como también de operatividad.

**Tabla 4-6: Valorización de parámetros de frecuencia.**

Parámetro	Categoría
Casi improbable que ocurra	1
Puede ocurrir alguna vez	2
Ocurre regularmente	3
Ocurre la mayor parte de las veces.	4

**Tabla 4-7: Valorización de parámetros de consecuencia.**

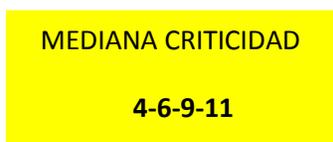
Clasificación	Categoría	Parámetro
<b>Sin importancia</b>	1	< Igual a 340 KPa, funcionamiento normal, película hidrodinámica estable 90 %, capaz de lubricar el cojinete.
<b>Leve</b>	2	340<P <240 KPa, Funcionamiento operación anormal con baja velocidad de turbogenerador (1500-2000 rpm).
<b>Seria</b>	3	240<P<80 KPa, Funcionamiento operación crítico, detención segura, película hidrodinámica al 30% capas de lubricar cojinetes.
<b>Grave</b>	4	80<P<0 KPa, Funcionamiento catastrófico, detención anómala con severas fallas en cojinetes y rotor.

- Para el área de operatividad se definió la siguiente tabla de consecuencia:

**Tabla 4-8: Valorización de parámetros de consecuencia.**

Clasificación	Categoría	Parámetro
<b>Sin importancia</b>	1	Funcionamiento en parámetros óptimos.
<b>Leve</b>	2	Funcionamiento operación anormal con baja velocidad.
<b>Seria</b>	3	Funcionamiento operación crítico, detención segura, película hidrodinámica capas de lubricar cojinetes.
<b>Grave</b>	4	Funcionamiento catastrófico, detención anómala con severas fallas en cojinetes y rotor.

Con el fin de representar visualmente la magnitud de la criticidad se estableció cromáticamente una escala de colores, la cual designa el nivel de riesgo asociado a cada nodo. El color verde indica una baja criticidad, implicando que la desviación o ID asociada a ese modo de falla no tiene mayor relevancia en la confiabilidad del sistema lubricación de emergencia. El color amarillo indica una mediana criticidad, implicando que si bien afecta la confiabilidad operacional del sistema, esta no es tan relevante. Finalmente el color rojo indica una alta criticidad a la desviación o ID, afectando fuertemente la confiabilidad operacional del sistema lubricación de emergencia.



**4.6.2-Resultados de criticidad.**

Los parámetros de evaluación de criticidad se aplico a las dos áreas analizadas por la metodología Hazop, tanto el área de diseño como al área de operatividad. Para evaluar cada falla, fue necesaria la opinión en conjunto con los operadores, asignando así una criticidad consistente a cada nodo con su desviación o ID, obteniendo los resultados que se representan en las siguientes tablas:

**Tabla 4-9: Criticidad de nodos área diseño.**

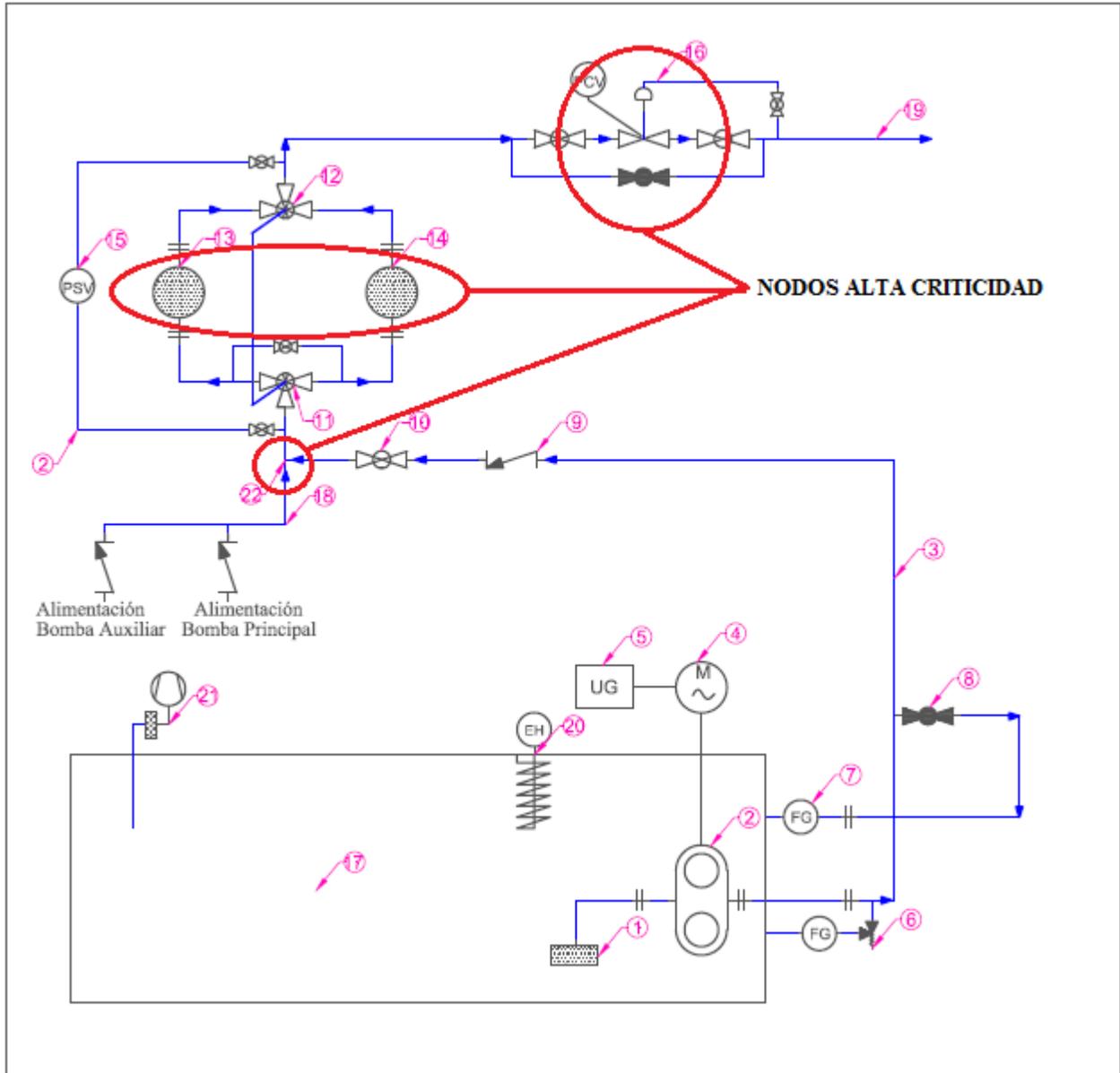
<b>Nodo</b>	<b>Variable</b>	<b>Desviación</b>	<b>Consecuencia</b>	<b>frecuencia</b>	<b>Criticidad</b>
1	Separar	ID1	1	1	1
2	Presión	ID2	4	1	4
		ID3	3	2	6
		ID4	4	2	8
	Caudal	ID5	4	2	8
3	Caudal	ID6	4	1	4
		ID7	3	1	3
4	actúa	ID8	4	2	8
		ID9	2	1	2
5	corriente	ID10	3	2	4
		ID11	2	2	4
6	actúa	ID12	2	2	4
	conserva	ID13	3	1	3
7	actúa	ID14	1	1	1
9	Caudal	ID15	2	2	4
	Presión	ID16	3	2	6

<b>Nodo</b>	<b>Variable</b>	<b>falla</b>	<b>Consecuencia</b>	<b>frecuencia</b>	<b>Criticidad</b>
11,12	Presión	ID17	4	2	8
	actúa	ID18	4	2	8
13,14	Presión	ID19	4	4	16
	actúa	ID20	2	2	4
	actúa	ID21	3	2	6
	Viscosidad	ID22	2	1	2
15	Presión	ID23	2	1	2
16	Presión	ID24	4	3	12
	Caudal	ID25	2	2	4
17	Volumen	ID26	4	1	4
	Volumen	ID27	2	2	4
18	Presión	ID28	3	2	6
	Presión	ID29	2	2	4
19	Presión	ID30	4	2	8
20	Temperatura	ID31	2	2	4
21	Separar	ID32	3	2	6
	actúa	ID33	2	2	4
22	Presión	ID34	4	2	12

**Tabla 4-10: Criticidad de nodos área operatividad.**

<b>Nodo</b>	<b>Variable</b>	<b>Falla</b>	<b>Consecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Criticidad</b>
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16.	Planeación	ID.1	2	1	2
		ID.2	2	2	4
	Procedimiento	ID.3	2	2	4
		ID.4	3	2	6
	Capacitación	ID.5	2	1	2
		ID.6	3	2	6
13, 14	Planeación	ID.7	3	2	6
		ID.8	3	2	6
	Procedimiento	ID.9	4	2	8
		ID.10	4	3	12
	Capacitación	ID.11	3	2	6
		ID.12	3	2	6

La Tabla 4-9 y Tabla 4-10 muestran los resultados obtenidos al evaluar los parámetros de frecuencia y consecuencia en los nodos para cada una de sus desviaciones o ID. Se aprecian 4 desviaciones críticas asociadas a nodos críticos en el sistema de lubricación de emergencia, con la variable de análisis “presión”. Tales nodos son (13), (14), pertenecientes al sistema de filtros dúplex, (16), perteneciente al sistema de regulación de presión y el nodo (22) que corresponde al anclaje de unión de los conductos de “Sistema aceite Principal” con el “Sistema aceite de Emergencia”. Todos arrojando un comportamiento crítico.



**Figura 4-3: Nodos críticos sistema aceite lubricación turbogenerador Fase I Nueva Aldea.**

En la Figura 4-3 se aprecian los nodos críticos del sistema aceite de lubricación. Los nodos (13), (14), (16) y (22). Estos nodos afectan considerablemente la confiabilidad operacional del sistema de lubricación.

Los nodos (13), (14), pertenecientes al sistema de filtros dúplex, presentan una desviación crítica identificada como ID19, muy común, en donde se obstruyen los elementos filtrantes producto de sedimentos propios del proceso. Al proceder con el cambio de elementos filtrantes, éstos son un cuello de botella para el “sistema aceite de emergencia”, ya que comparten el mismo conducto aguas arriba, quedando inhabilitada su función de diseño, la cual es “lubricar los cojinetes a una presión de 100KPa en caso de detenciones imprevistas”.

El nodo (16), perteneciente a una serie de válvulas en serie, tiene como función regular la presión a la entrada de los cojinetes, si bien la falla crítica identificada como ID24, no es tan frecuente, es crítica, debido a que estas válvulas comparte el mismo conducto aguas arriba del sistema aceite de emergencia, quedando de igual forma inhabilitado, no logrando las condiciones aceptables para restablecer la presión en los cojinetes, perdiéndose la película hidrodinámica.

El nodo (22) perteneciente al anclaje de los conductos de “sistema aceite principal” con “sistema aceite de emergencia”, indica una falla crítica identificada como ID34, donde se produce menor presión en los cojinetes turbina generador producto de una falla en la junta de los conductos. Esta falla es poco recurrente. Sin embargo es la clave de este análisis, ya que representa el punto donde comienza el cuello de botella que inhabilita cualquier función de diseño del “sistema aceite de emergencia”.

En la Tabla 4-11, muestra en resumen las desviaciones o fallas, identificadas por su ID en el Hazop (Ver Anexo IV), para cada nodo crítico.

**Tabla 4-11: Desviaciones críticas como resultado de análisis.**

<b>Nodo</b>	<b>Identificación Desviación en Hazop</b>	<b>Desviación crítica</b>
<b>(13) (14)</b>	<b>ID19</b>	Diferencial de presión sobre 100 Kpa.
<b>(16)</b>	<b>ID24</b>	Variaciones significativas de presión en descansos y reductor.
<b>(22)</b>	<b>ID34</b>	Menos presión de aceite en complejo cojinetes turbina reductor y caja reductora.
<b>(13) (14)</b>	<b>ID10</b>	No se proporciona la documentación adecuada para realizar las mantenciones periódicas.

**4.7.-Análisis de sistemas de lubricación en plantas.**

A continuación, se presenta un análisis de la condición de los nodos críticos obtenidos anteriormente, los cuales se aplicarán a los “Sistemas de Lubricación de Emergencia” de las Plantas Nueva Aldea, Licancel, Horcones, Constitución y Valdivia respectivamente. Esto con el fin de establecer una estandarización y evaluar el estado de los sistemas lubricación aceite de emergencia.

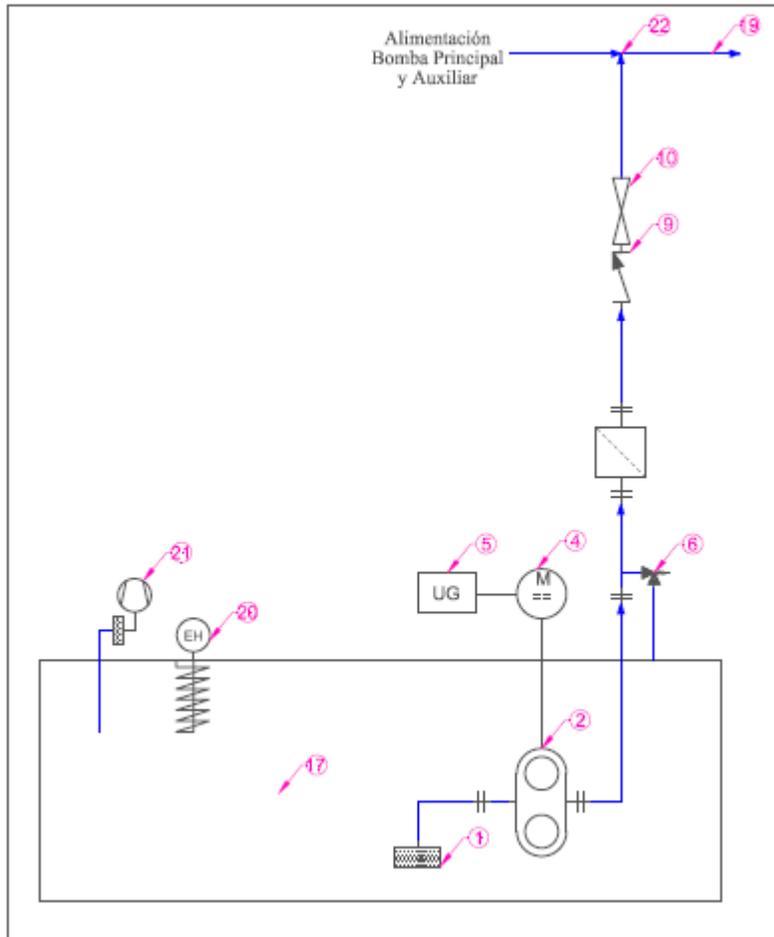
La Tabla 4-11, muestra la denominación de los turbogeneradores que se analizaran en esta etapa. Las denominaciones TG (Turbo- Generador) que se observan, son propias de la industria, con el fin de acortar el nombre.

**Tabla 4-12: Turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A.**

<i>Planta</i>	<i>Denominación de turbogeneradores</i>	<i>Marca</i>
<b>Nueva Aldea</b>	TG-1 FASE I	Novo Pignone
	TG 2	Novo Pignone
	TG 3	Novo Pignone
<b>Licancel</b>	TG 1	ABB
	TG 2	Alstom
	TG 3	Siemens
<b>Horcones</b>	TG 2	Siemens
	TG 3	Siemens
	TG 4/5	ABB
	TG 6	Novo Pignone
<b>Constitución</b>	TG 1	G. Electric
	TG 2	ABB
	TG 3	Siemens
<b>Valdivia</b>	VALGEN 1	Siemens
	VALGEN 2	Siemens

#### 4.7.1.-Nueva Aldea Turbogeneradores TG-2 y TG-3.

Los sistemas aceite lubricación en estos turbogeneradores TG-2 y TG-3 son independientes uno del otro, pero iguales en su diseño. A continuación se representa el diseño de sus sistemas aceite de emergencia.

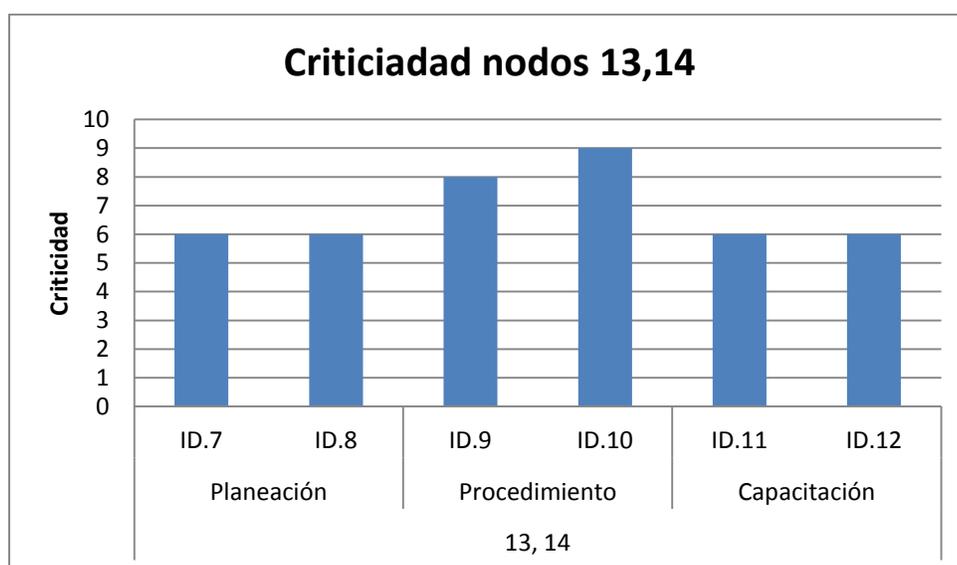


**Figura 4-4: Sistema aceite de emergencia TG-2 Y TG-3 Nueva Aldea.**

En la Figura 4-4, se aprecia que los nodos críticos (13) y (14), pertenecientes a los filtros dúplex, no se encuentran considerados en el “sistema aceite de emergencia”. Esto se debe a que este diseño es independiente del “sistema aceite principal”. Para reemplazar la función de limpieza de los filtros dúplex, se instaló un filtro aguas arriba totalmente independiente, lo que inhabilita cualquier desviación o falla crítica identificada como ID19. (Ver Anexo IV).

El nodo (22) está ubicado en seguida del nodo (16), por lo que la desviación crítica ID24, correspondiente a ese nodo, disminuiría su consecuencia, por ende también su criticidad. Esto se debe a que de alguna manera existiría alimentación por parte del “sistema aceite de emergencia” debido a la posición del nodo (22).

Con respecto al análisis de operatividad, la falla identificada como ID10, cuya variable es el procedimiento de cambio de elemento filtrante, ya no sería de criticidad alta. El Figura 4-5 demuestra que su consecuencia desde el punto de vista operacional disminuiría y por ende su criticidad se encuentra en el rango admisible que va desde 4 a 11, quedando con una criticidad de 9.



**Figura 4-5: Criticidad de nodos 13,14 Hazop operatividad.**

Cabe destacar que el sistema de seguridad de estos turbogeneradores cuenta con varias condiciones de respaldo ante condiciones desfavorables de operación.

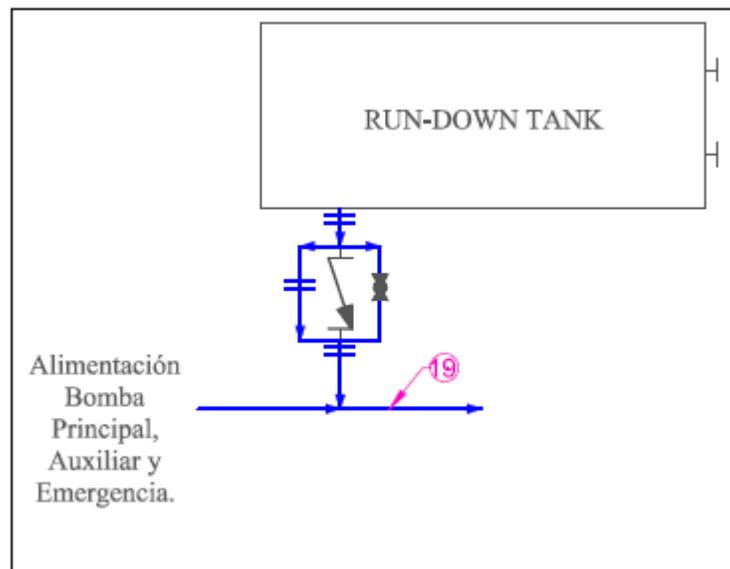
- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de respaldo son muy variables en caso de una detención imprevista. Estos tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador, manteniéndolo en funcionamiento. En la Figura 4-6, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-6: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG2 Y TG3 N ueva Aldea.**

Los TG-2 y TG-3 además de su sistema aceite de emergencia (Figura 4-4), están respaldados por un estanque llamado RUN DOWN TANK. Este está diseñado como auxilio en caso de una falla en bomba de la bomba de emergencia, o se produzca una falla en los nodos críticos (13), (14), (16), (22). En esos casos este estanque es capaz de producir una presión de 80 KPa a partir de una cota de altura que posee, lubricando así los cojinetes y caja reductora, asegurando una detención segura de la turbina.



**Figura 4-7: Run Down Tank TG-2 Y TG-3 Nueva Aldea.**

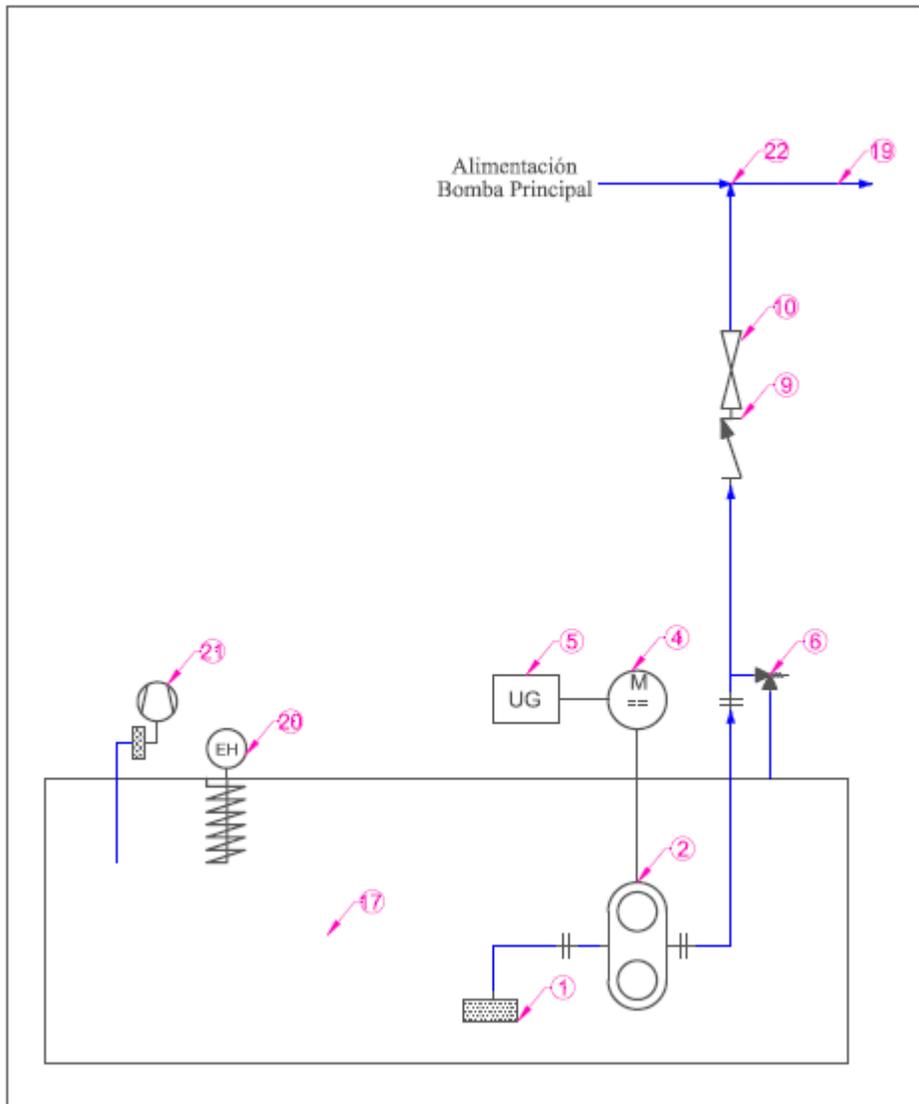
Finalmente se puede mencionar que el diseño del sistema de lubricación está bien implementado, ya que las desviaciones asociadas a los nodos son mínimas.

El diseño omite los nodos (13), (14) pertenecientes a los filtros dúplex y (16), que regula la presión a la entrada de los cojinetes. Si bien pertenecen al sistema de lubricación, no son un cuello de botella, permitiendo así que una aceptable función del “sistema aceite de emergencia”. Además cabe destacar que los nodos cumplen con su función de diseño, sin depender de otros nodos o sistemas.

Las condiciones de respaldo hacen que el sistema sea más confiable desde el punto de vista operacional, asegurando una buena detención de las turbinas en caso de un trip.

**4.7.2.-Licancel turbogeneradores TG-1 y TG-2.**

Los sistemas aceite lubricación en estos turbogeneradores son independientes uno del otro, pero iguales en su diseño. A continuación se representa el diseño de sus sistemas aceite de emergencia.



**Figura 4-8: Sistema aceite de emergencia TG-1 Y TG-2 Licancel.**

En la Figura 4-8, los nodos (13) y (14), pertenecientes a los filtros dúplex, no se encuentran considerados en el sistema aceite de emergencia. Esto se debe a que este diseño es independiente del sistema aceite lubricación principal. Cabe mencionar que no contiene un filtro estándar aguas arriba independiente, lo que inhabilita cualquier falla crítica de tipo ID19 (Ver Anexo IV). Sin embargo a la larga dicha indicación puede ser perjudicial, si no se cumplen con los parámetros de purificación y limpieza de aceite que establecen las normas, (Ver Anexo III).

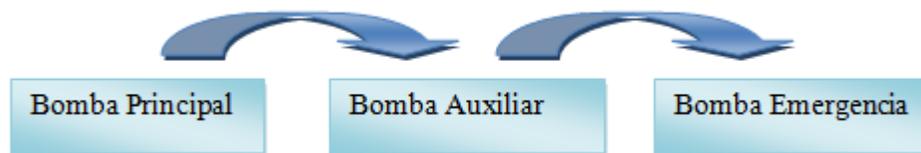
El nodo (22) a continuación del nodo (16), por lo que la falla crítica ID24 correspondiente a ese nodo queda inhabilitado.

Con respecto al análisis de operatividad, la falla ID10, cuya variable es el procedimiento de cambio de elemento filtrante pertenecientes a los filtros dúplex, nodos (13) y (14), ya no sería de criticidad alta, debido a que tal intervención no afectaría la continuidad de la lubricación, ya que el sistema de filtros dúplex es independiente del sistema aceite de emergencia.

Cabe destacar que el sistema de seguridad de estos turbogeneradores cuenta con varias condiciones de respaldo ante condiciones desfavorables de falla.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-9, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-9: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Licancel.**

Los TG-1 y TG-2 de Licancel posee una bomba principal en su sistema de lubricación, la cual tiene como función lograr una presión de 340 KPa para su funcionamiento normal, manteniendo una película hidrodinámica estable en los cojinetes. Si falla esta bomba principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba auxiliar, aproximadamente a los 240 KPa. Esta debe ser capaz de proporcionar y recuperar la presión. Si esta falla, para una detención segura del rotor se

envía un serial de partida, accionando la bomba de emergencia, aportando una presión de 100KPa, asegurando una detención y enfriamiento seguro del rotor. Todas las bombas pueden funcionar al mismo tiempo, para que, en caso de pérdida de presión, sean capaces de complementarse.

Finalmente el estado de los nodos críticos (13), (14) y (16) en el diseño no generan indicaciones de criticidad grave, ya que ninguno forma un cuello de botella con respecto al sistema aceite de emergencia. Tanto los sistemas de aceite principal como el sistema aceite de emergencia son paralelos e independientes, cumpliendo sus funciones de diseño.

Cabe destacar que el sistema aceite de emergencia no posee ninguna clase de filtro en su circuito, por lo tanto presenta un riesgo evaluable desde el punto de vista en que el fluido debe tener una limpieza mínima (Ver Anexo IV), evitando ralladuras en el material Babbit de los cojinetes, como también salpicaduras en los engranajes de caja reductora. Sin embargo los costos asociados, en comparación a una detención sin película de aceite son despreciables.

#### 4.7.4.-Horcones turbogeneradores TG-2, TG-3, TG-4/5, TG-6.

Debido a la variabilidad de los sistemas de lubricación de esta planta, especialmente en el de emergencia, se analizaron los sistemas por separado, para tener un levantamiento del estado de cada uno.

##### 4.7.4.1.-TG-2 y TG-3.

Los sistemas aceite lubricación en estos turbogeneradores son independientes uno del otro, pero iguales en su diseño. A continuación se representa el diseño de sus sistemas aceite de emergencia.

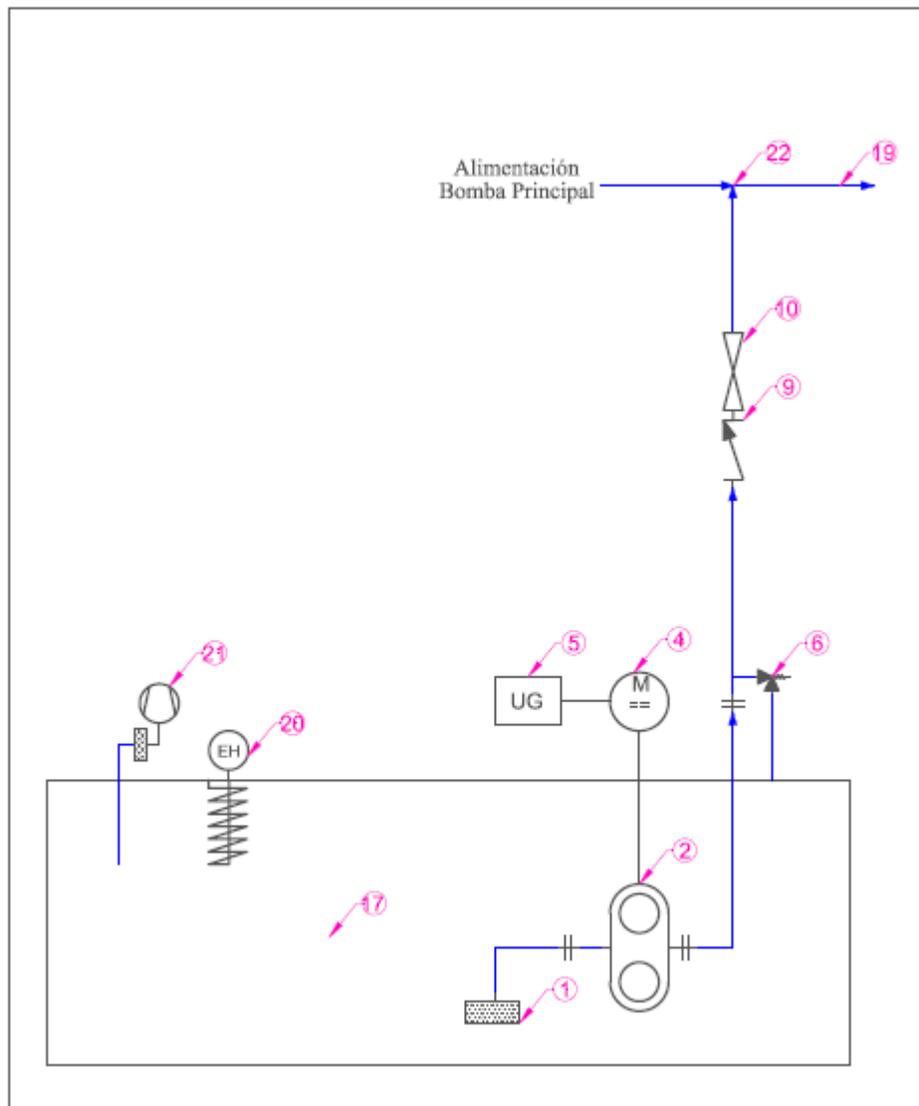


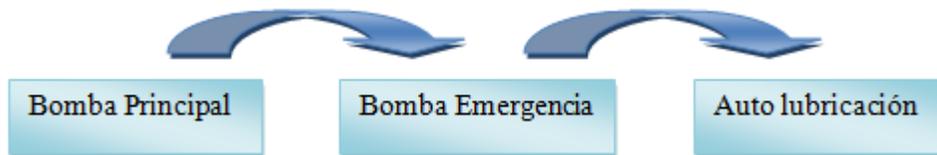
Figura 4-10: Sistema aceite de emergencia TG-2 Y TG-3 Horcones.

La ubicación de los nodos críticos (13), (14) y (16) en el diseño no generan indicaciones de criticidad grave, ya que ninguno forma un cuello de botella con respecto al sistema aceite de emergencia.

Tanto los sistemas de aceite principal como el sistema aceite de emergencia son paralelos e independientes, cumpliendo sus funciones de diseño.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-11, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-11: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG2 y TG3 Horcones.**

Los TG-2 y TG-3 poseen solo una bomba principal en su sistema, la cual tiene como función lograr una presión aproximada de 340 KPa, manteniendo una película hidrodinámica estable en los cojinetes. Si falla esta bomba principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba de emergencia. Esta debe ser capaz de proporcionar la presión de 100 KPa para una detención segura del rotor. A la misma vez estas bombas pueden funcionar al mismo tiempo, así en caso de pérdida de presión, sean capas de complementarse.

Cabe mencionar que estos turbogeneradores poseen un sistema de autolubricación de emergencia, diseñado por el fabricante. Este consiste en una pequeña bomba ubicada al lado del rotor que succiona aceite del estanque principal, lubricando los cojinetes.

Las condiciones de respaldo hacen que el sistema sea más confiable desde el punto de vista operacional, sin embargo, el diseño depende mucho del funcionamiento de la bomba principal y de

emergencia. Si bien estos turbogeneradores poseen una auto-lubricación, esto no implica que al suceder una falla de baja de presión en los conductos y cojinetes, se provoque una detención segura, pero “inminente”. En muchos casos estos sistemas de respaldo son diseñados para mantener en giro lento la turbina mientras se soluciona el problema, así se evita la paralización total del rotor.

Cabe destacar que el sistema aceite de emergencia no posee ninguna clase de filtro en su circuito, por lo tanto presenta un riesgo evaluable desde el punto de vista, en que el fluido debe tener una limpieza mínima normalizada (Ver Anexo IV), evitando ralladuras en el material Babbit de los cojinetes, como también salpicaduras en los engranajes de caja reductora. Sin embargo los costos asociados, en comparación a una detención sin película de aceite son despreciables.

#### 4.7.4.2.- TG-4/5

El diseño del sistema aceite de emergencia en este turbogenerador es similar al diseño del turbogenerador fase 1 Nueva Aldea. Lo que implica que los nodos críticos (13), (14), (16), y (22) tienen el mismo comportamiento.

A continuación se representa el diseño del aceite de emergencia.

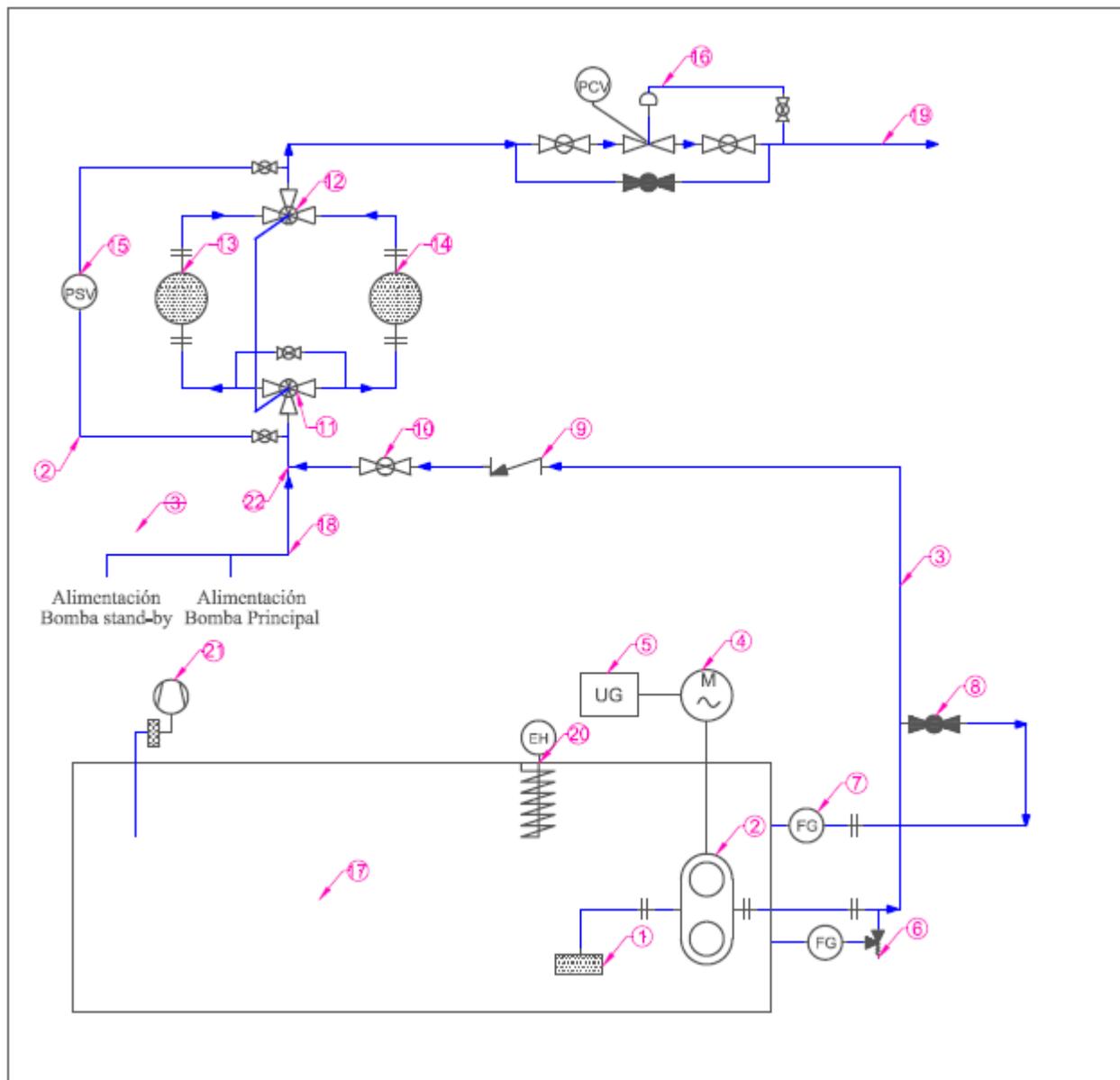
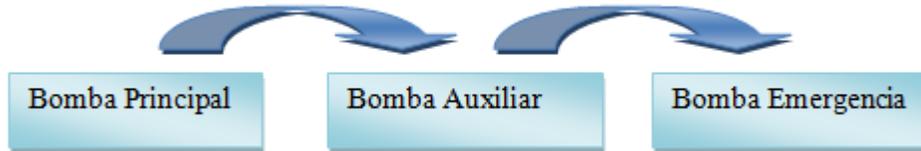


Figura 4-12: Sistema aceite de emergencia TG-4/5 Horcones.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-13, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-13: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG4/5 Horcones.**

El TG-4/5 posee una bomba principal en su sistema, la cual tiene como función lograr una presión de 340 KPa para su funcionamiento normal, manteniendo una película hidrodinámica estable en los cojinetes. Si falla esta bomba principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba auxiliar, aproximadamente a los 240 KPa. Esta debe ser capaz de proporcionar y recuperar la presión. Si falla, para una detención segura del rotor, se envía un serial de partida, accionando la bomba de emergencia, aportando una presión de 100KPa. Estas bombas pueden funcionar al mismo tiempo, así en caso de pérdida de presión, sean capaces de complementarse.

El de los nodos críticos (13), (14), (16) en el diseño generan indicaciones de criticidad grave, ya que forman un cuello de botella con respecto al sistema aceite de emergencia.

Los sistemas de aceite principal y de emergencia dependen uno del otro, generando principalmente problemas asociados a procedimientos, cuya causa proviene de un mal diseño de estos.

Las condiciones de respaldo hacen que el sistema sea más confiable desde el punto de vista operacional, sin embargo, el diseño depende mucho del funcionamiento de la bomba principal y de emergencia. Esto implica que al suceder una desviación ID19, ID24, ID34 de baja de presión, implique una detención segura, pero “inminente” ya que el diseño no es mejor desde el punto de vista operacional.

#### 4.7.4.3.- TG-6

El diseño del sistema aceite de emergencia en este turbogenerador se caracteriza por ser similar al usado en los turbogeneradores TG-2 y TG-3 de Planta Nueva Aldea.

La distribución de sus nodos críticos (13), (14), (16), (22) es la misma, por lo tanto posee la misma vulnerabilidad tanto en diseño como de operatividad de procedimientos.

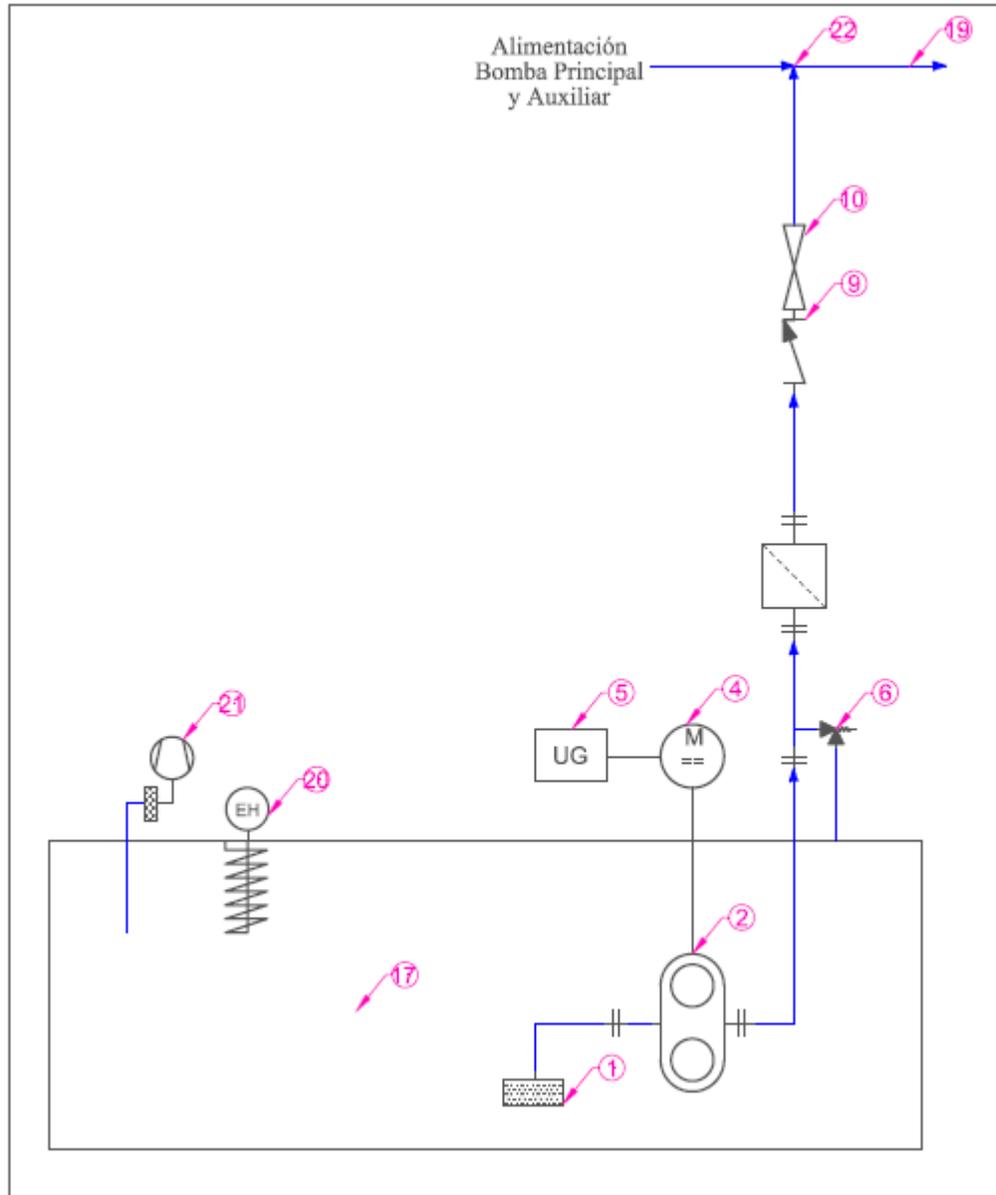
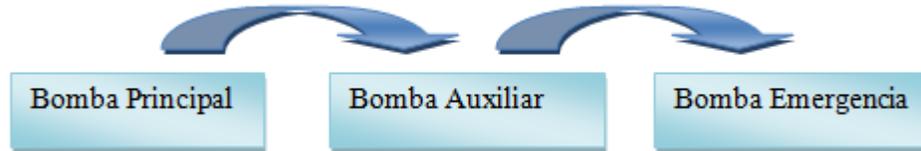


Figura 4-14: Sistema aceite de emergencia TG-6 Horcones.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-15, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-15: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG6 Horcones.**

El TG-6 posee una bomba principal en su sistema, la cual tiene como función lograr una presión de 340 KPa, manteniendo una película hidrodinámica en los cojinetes. Si falla esta bomba principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba stand by, a los 240 KPa. Esta debe ser capaz de proporcionar y recuperar la presión a su normalidad. Si esta falla, para una detención segura del rotor, se envía un serial de partida, accionando la bomba de emergencia que inyecta aceite a una presión de 100 KPa.

Estas bombas pueden funcionar al mismo tiempo, así en caso de pérdida de presión sean capaz de complementarse.

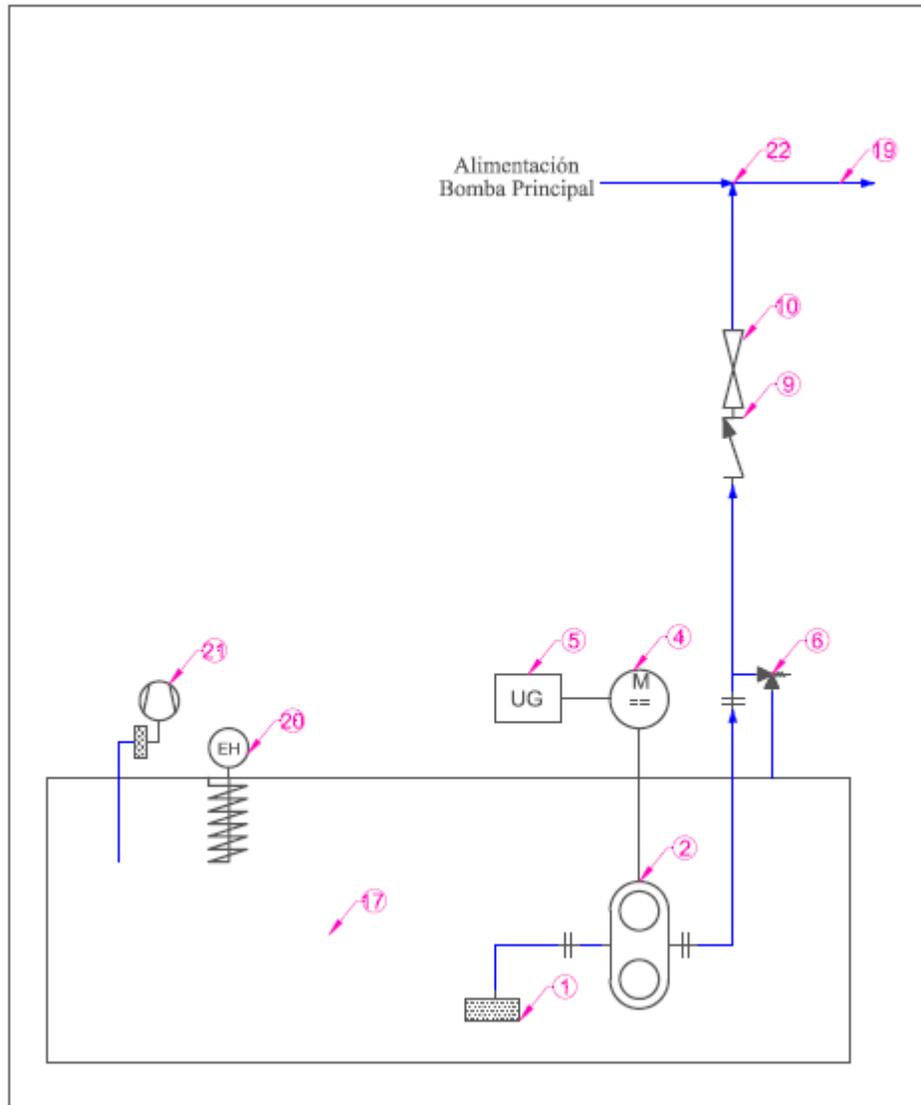
Finalmente los nodos críticos (13), (14), (16) en el diseño no generan indicaciones de criticidad grave, ya que ninguno forma un cuello de botella con respecto al sistema aceite de emergencia.

Tanto los sistemas de aceite principal como de emergencia son paralelos e independientes, lo que es beneficioso, no agravando posibles errores de procedimientos en estos nodos.

Las condiciones de respaldo hacen que el sistema sea más confiable desde el punto de vista operacional, El equipo cuenta con tres bombas, de las cuales dos aportan aceite aguas arriba del sistema aceite principal, y la tercera bomba perteneciente al sistema aceite de emergencia independiente.

#### 4.7.5.-Constitución turbogeneradores TG-1 y TG-2.

Los sistemas aceite lubricación en estos turbogeneradores son independientes uno del otro, pero iguales en su diseño. A continuación se representa el diseño de sus sistemas aceite de emergencia.



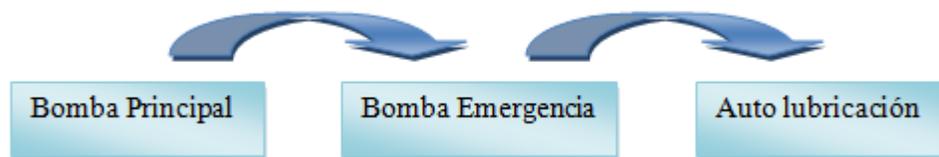
**Figura 4-16: Sistema aceite de emergencia TG-1 Y TG-2 Constitución.**

La ubicación de los nodos críticos (13), (14) y (16) en el diseño no generan indicaciones de criticidad grave, ya que ninguno forma un cuello de botella con respecto al sistema aceite de emergencia.

Tanto los sistemas de aceite principal como el sistema aceite de emergencia son paralelos e independientes, cumpliendo sus funciones de diseño.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-17, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-17: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Constitución.**

Los TG-2 y TG-3 poseen solo una bomba principal en su sistema, la cual tiene como función lograr una presión aproximada de 340 KPa, manteniendo una película hidrodinámica estable en los cojinetes. Si falla esta bomba principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba de emergencia. Esta debe ser capaz de proporcionar la presión de 100 KPa para una detención segura del rotor. A la misma vez estas bombas pueden funcionar al mismo tiempo, así en caso de pérdida de presión, sean capas de complementarse.

Cabe mencionar que estos turbogeneradores poseen un sistema de autolubricación de emergencia, diseñado por el fabricante. Este consiste en una pequeña bomba ubicada al lado del rotor que succiona aceite del estanque principal, lubricando los cojinetes.

Al igual que anteriormente las condiciones de respaldo hacen que el sistema sea más confiable desde el punto de vista operacional, sin embargo, el diseño depende mucho del funcionamiento de la bomba principal y de emergencia. Si bien estos turbogeneradores poseen una auto-lubricación, esto no implica que al suceder una falla de baja de presión en los conductos y cojinetes, sin embargo se provoca una detención segura, pero “inminente”. En muchos casos estos sistemas de respaldo son diseñados para mantener en giro lento la turbina mientras se soluciona el problema, así evitando la paralización total del rotor.

Cabe destacar que el sistema aceite de emergencia no posee ninguna clase de filtro en su circuito, por lo tanto presenta un riesgo evaluable desde el punto de vista en que el fluido debe tener una limpieza mínima (Ver Anexo IV), evitando ralladuras en el material Babbit de los cojinetes, como también salpicaduras en los engranajes de caja reductora. Sin embargo los costos asociados, en comparación a una detención sin película de aceite son despreciables.

#### 4.7.6.-Valdivia turbogeneradores TG-1 y TG-2.

El diseño del sistema aceite de emergencia en estos turbogeneradores es igual e independiente cada uno. A continuación se muestra su diseño.

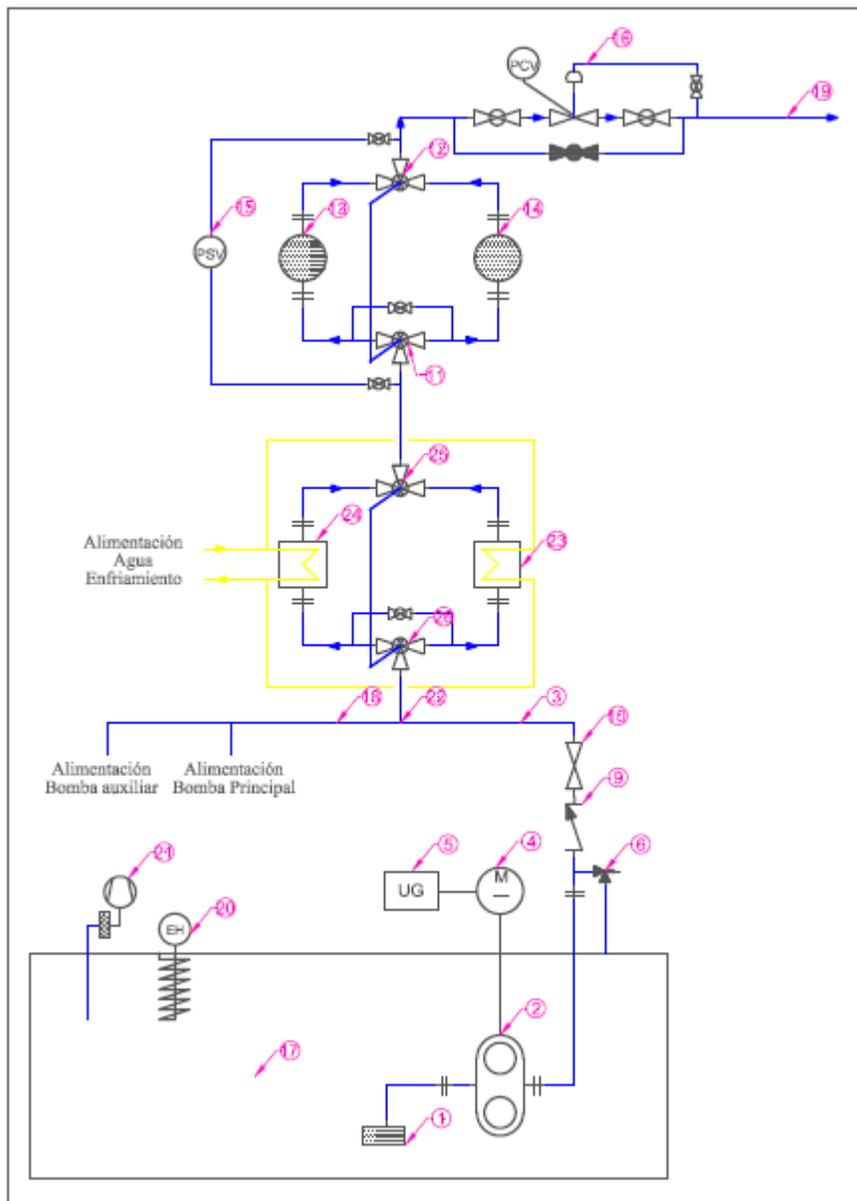


Figura 4-18: Sistema aceite de emergencia TG-1 y TG-2 Valdivia.

En la Figura 4-16, los nodos (13), (14) pertenecientes a los filtros dúplex se encuentran formando un cuello de botella, lo que implica que su criticidad no ha cambiado. Esto conlleva a que la desviación ID19 sea altamente riesgosa con respecto a la variable presión en el diseño.

El nodo (16) regula la presión en el sistema. Su criticidad se mantiene, debido a que la falla ID24 de variable presión al suceder queda expuesta debido a la posición de diseño del nodo, dejándolo inhabilitado para cumplir con su función de diseño.

Por otra parte, el nodo (22), perteneciente a la junta unión de los conductos de alimentación aceite principal y de emergencia. Su criticidad no varía respecto al análisis inicial, ya que su posición de diseño inhabilita cualquier acción de respaldo del sistema aceite de emergencia, por lo que la desviación ID34 posee un alto riesgo.

Debido al diseño del sistema, se debió aplicar la metodología Hazop puntualmente a los intercambiadores de calor presentes (Ver anexo IV), ya que el Hazop inicial aplicado al turbogenerador Fase I Nueva Aldea no están considerados en el sistema aceite de emergencia.

**4.7.6.1.-Resultados de criticidad.**

Se evaluó el Hazop con la metodología de magnitud del riesgo obteniendo los siguientes parámetros:

**Tabla 4-13: Criticidad de nodos área diseño de intercambiadores de calor.**

Nodo	Variable	Falla	Consecuencia	Frecuencia	Criticidad
23,24	actúa	ID35	3	2	6
25,26	Temperatura	ID36	4	3	12
	Temperatura	ID37	3	2	6

La Tabla 4-13 muestra los resultados obtenidos al aplicar los parámetros de frecuencia y consecuencia a los nodos en cada una de sus desviaciones o ID perteneciente a los intercambiadores

de calor. Se aprecia 1 falla con desviación crítica en los nodos (25), (26) con la variable de análisis temperatura.

Por lo tanto a los nodos críticos (13), (14), (16) y (22) se les suman los nodos (25), (26) como se muestra en la siguiente figura.

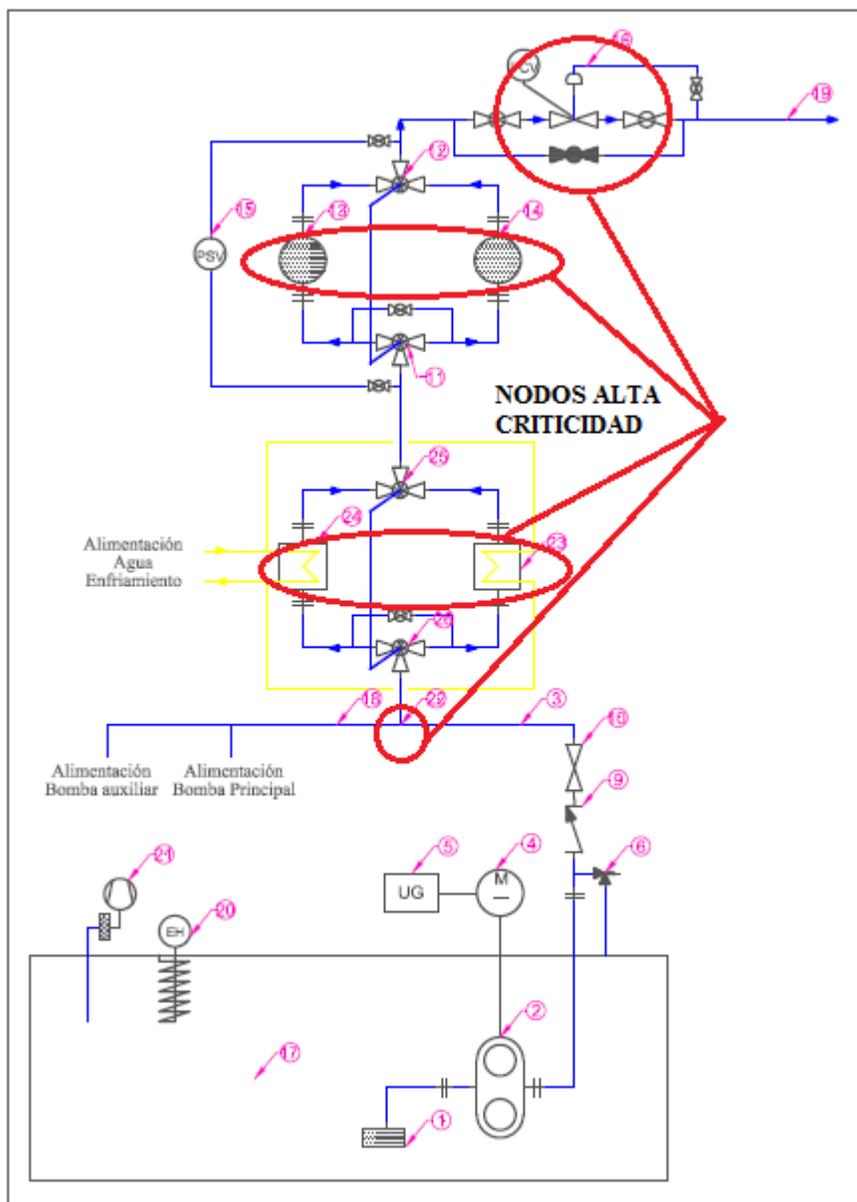


Figura 4-19: Nodos críticos de sistema aceite emergencia TG-1 TG-2 Valdivia.

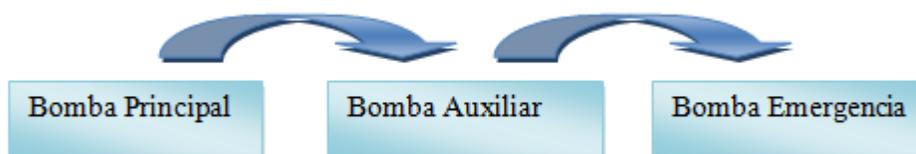
Con el uso de la metodología Hazop se diagnosticaron nuevos puntos críticos (25), (26), arrojando una desviación crítica asociada ID35, la cual inhabilita cualquier acción de respaldo y funcionamiento del diseño del sistema aceite de emergencia.

**Tabla 4-14: Desviaciones críticas como resultado de análisis.**

Nodo	Identificación Desviación en Hazop	Desviación crítica
(13) (14)	ID19	Diferencial de presión sobre 100 KPa.
(16)	ID24	Variaciones significativas de presión en descansos y reductor.
(22)	ID34	Menos presión de aceite en complejo cojinetes turbina reductor y caja reductora.
(13) (14)	ID10	No se proporciona la documentación adecuada para realizar las mantenciones periódicas.
(25) (26)	ID35	No enfría aceite de lubricación.

- **Equipos de respaldo.**

Los equipos de lubricación de respaldo tienen como función asegurar la confiabilidad operacional del turbogenerador frente a cualquier imprevisto. En la Figura 4-18, se muestra la secuencia de accionamiento de los equipos asociados.



**Figura 4-20: Secuencia de accionamiento equipos de respaldo TG1 y TG2 Valdivia.**

Los TG-1 y TG-2 poseen una bomba principal en su sistema, la cual tiene como función lograr una presión de 340 KPa, manteniendo una película hidrodinámica en los cojinetes. Si falla esta bomba

principal, se envía un serial de partida inmediata, accionándose la bomba auxiliar, a los 240 KPa. Esta debe ser capaz de proporcionar y recuperar la presión a su normalidad. Si ésta falla, para una detención segura del rotor, se envía un serial de partida, accionando la bomba de emergencia que inyecta aceite a una presión de 100 KPa. Estas bombas pueden funcionar al mismo tiempo, así, en caso de pérdida de presión sean capaz de complementarse.

**Tabla 4-15: Estado de nodos críticos y equipos de respaldo en sistemas de lubricación turbogeneradores Celulosa Arauco y Constitución S.A.**

Planta	TG's	Nodos críticos						Equipos de respaldo			
		22	13	14	16	25	26	Bomba principal	Bomba stand by	Bomba Emergencia	Run Down Tank
Nueva Aldea Paneles	TG-F1	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-
Nueva Aldea	TG-2;TG-3	X	-	-	-	-	-	X	X	X	X
Licancel	TG-1;TG-2	X	-	-	-	-	-	X	X	X	-
Horcones	TG-2;TG-3	X	-	-	-	-	-	X	-	X	-
	TG-4/5	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-
	TG-6	X	-	-	-	-	-	X	X	X	-
Constitución	TG-2;TG-3	X	-	-	-	-	-	X	X	X	-
Valdivia	TG-1;TG-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-

Los colores representados son indicadores:

 Baja confiabilidad operacional del sistema de lubricación de emergencia.

 Alta confiabilidad operacional del sistema de lubricación de emergencia.

Luego de evaluar el estado de los nodos críticos, y los equipos de respaldo en las cinco Plantas que constituyen el complejo, se observa que el diseño del sistema de lubricación de emergencia de Planta Valdivia posee graves falencias. Su diseño propiamente tal es poco confiable operacionalmente, ya que cualquier intervención errónea en sus equipos podría provocar una falla catastrófica. Su sistema de lubricación de emergencia posee seis nodos críticos, implicando numerosas fallas asociadas que se pueden apreciar en Anexo IV.

## CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.

En el desarrollo de esta Habilitación Profesional, se analizó la falla catastrófica ocurrida en el turbogenerador Fase I, ubicado en Planta Nueva Aldea. Los antecedentes indicaron que la falla ocurrió por la pérdida de la lubricación en los cojinetes, siendo la causa raíz, normalizada según la norma ISO 14224, un error de documentación, específicamente de procedimiento al realizar el cambio de los elementos filtrantes del sistema.

Se aplicó la metodología de análisis Hazop, la cual permite evaluar la condición de la falla ocurrida, de tal manera de buscar soluciones consistentes, tomar decisiones y medidas necesarias para aumentar la confiabilidad de los turbogeneradores. Al aplicar el análisis Hazop, se establecieron nodos críticos o condiciones de riesgo a partir de la evaluación de desviaciones o fallas.

Tras los resultados de criticidad obtenidos, podemos concluir que el diseño del sistema aceite lubricación del turbogenerador Fase I Nueva Aldea, posee falencias en sus instalaciones, tanto en parámetros de diseño, como en su operatividad. Los nodos críticos tienen en común su dependencia de continuidad, formando cuellos de botella, afectando directamente la función del sistema lubricación de emergencia, la cual es “lubricar y enfriar los cojinetes ante un evento inesperado o trip, asegurando una detención segura, sin dañar gravemente el rotor, cojinetes y caja reductora”. Los nodos críticos se alejan demasiado de los propósitos de diseño que deben cumplir en la instalación.

Los nodos (13), (14), pertenecientes al sistema de filtros dúplex, presentan una falla muy común, en donde se obstruyen los elementos filtrantes producto de sedimentos propios del proceso. Al proceder con el cambio de elementos filtrantes, estos son un cuello de botella para el “sistema aceite de emergencia”, ya que comparten el mismo conducto aguas arriba, quedando inhabilitada su función de diseño, la cual es “lubricar los cojinetes a una presión de 100KPa en caso de detenciones imprevistas”.

El nodo (16), perteneciente a una serie de válvulas en secuencia, tiene como función regular la presión a la entrada de los cojinetes, si bien la falla no es tan frecuente, es crítica, debido a que estas válvulas comparten el mismo conducto aguas arriba del sistema aceite de emergencia, quedando de igual forma inhabilitado, no logrando las condiciones deseadas para restablecer la presión en los cojinetes, perdiéndose la película hidrodinámica.

El nodo (22) o anclaje de los conductos de “sistema aceite principal” con “sistema aceite de emergencia”, es la clave de este análisis, ya que representa el punto donde comienza el cuello de botella que inhabilita cualquier función de diseño del “sistema aceite de emergencia”.

Por lo tanto, es necesario modificar y encontrar una condición deseable para estos nodos, con el fin de disminuir sus condiciones de riesgo y criticidad asociadas. Tales soluciones apuntan a un redistribución de los elementos del sistema de lubricación, o a la búsqueda de un sistema que evite o minimice tales desviaciones.

El enfoque de redistribución como solución, apunta a evitar los nodos críticos (13), (14), (16). El diseño que cumple esta condición es un conducto paralelo e independiente al conducto de lubricación principal. Esto es posible, pero es necesario respetar los parámetros normados de limpieza necesaria, por lo que es imprescindible que el diseño contenga un filtro estándar, capaz de purificar el aceite que ingresa a los cojinetes, ya que la holgura que existe cuando se forma la película hidrodinámica, entre rotor y cojinete es de alrededor de 20 micrones.

En consecuencia, el buen diseño, aplicando la filosofía de mantenimiento proactivo, es aquel que presenta menos nodos críticos asociados a su sistema de lubricación de emergencia, centralizándose a atacar la causa raíz del problema, ya que todas las fallas asociadas a los nodos críticos, tales como errores de procedimientos, intervenciones de mantención entre otras, quedarían inhabilitadas, por lo que la confiabilidad operacional del sistema aumentaría. También otro parámetro que se debe considerar son los equipos de respaldo asociados, concluyendo que a mayor número de equipos, la confiabilidad operacional es mayor.

Los turbogeneradores TG1 y TG2 de Planta Valdivia poseen defectos más graves en sus diseños de sistema de lubricación de emergencia, en comparación a la situación detectada en el turbogenerador Fase I Nueva Aldea. Estos al fallar, generarían graves consecuencias, ya que los sistemas y equipos de respaldo no cumplirían con su función de diseño, quedando inhabilitados operacionalmente.

Se deben generar los protocolos y estándares necesarios en las Plantas que posean los sistemas más susceptibles a fallar, evitando posibles errores de procedimientos realizados en intervenciones.

Con la implementación de procedimientos en el mediano plazo, se reducirán las acciones peligrosas y la exposición a riesgos de la instalación, por tanto, se evitarán fallas catastróficas y accidentes

cuando se modifique la cultura de trabajo por la conciencia basada en el conocimiento de los riesgos, el uso de manuales y una actitud de vigilancia colectiva.

La información, formación y capacitación de los profesionales del área de operación juega un papel importante en el desarrollo de trabajos de mantención, estos deben ser capaces de captar los procedimientos de trabajo a la perfección, reconocer cuando existen posibilidades que ocurra una falla por agentes externos al sistema, conocer los resultados del estudio Hazop ya que permite conocer los modos de falla, asignando recomendaciones en caso que el evento ocurra, ocupándolos para su beneficio.

El diseño del plano del mejor sistema analizado, desde el punto de vista del área de diseño y operatividad, se encuentra en la Planta Nueva Aldea, específicamente TG2-TG3. Su diseño es altamente confiable, posee pocos nodos críticos asociados a su línea de emergencia, como también un gran respaldo de equipos de impulsión, proporcionando las condiciones de caudal y presión necesarias para el funcionamiento.

Finalmente se concluye que la metodología investigada es altamente aplicable en el área de mantenimiento ya que es una herramienta que permite diagnosticar las posibles falencias en los sistemas de proceso, permitiendo tomar decisiones con respecto a qué tipo de mantenimiento es necesario implementar; para aumentar así, la confiabilidad operacional y la vida útil de los equipos.

## ANEXO I : LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA.

Se analizarán los tópicos correspondientes a Lubricación, regímenes de lubricación, Cojinetes hidrodinámicos.

### 1.- Lubricación.

La lubricación constituye una función importante dentro del mantenimiento que soporta el proceso productivo. Prácticamente todos los componentes mecánicos de máquinas que están en movimiento ruedan o deslizan sobre superficies. Si estas superficies no están perfectamente lubricadas pueden desgastarse con rapidez, lo que a su vez provoca averías, excesos de costes de reparación, aumentos de tiempo de paradas inesperadas del activo.

Por otro lado, en el entorno industrial habitual se encuentran silicatos, óxidos, limaduras de metal que pueden ingresar a estos elementos que se contactan con movimiento relativo tales como cojinetes.

La presencia de un sistema adecuado y correctamente implementado de lubricación tiene como objetivo cumplir con las condiciones de diseño del activo, como también asegurar la vida útil de los componentes, reducir los costes de mantenimiento y costes de energía de accionamiento.

La utilización de lubricantes en el sector industrial puede tener varios objetivos, las funciones más importantes se presentan a continuación.

- Reducir la fricción y la energía de accionamiento: La inclusión de un fluido lubricante reduce el coeficiente de fricción de dos superficies materiales en contacto. Dado que la fuerza de fricción se opone al movimiento, la lubricación reduce tal oposición y con ello la energía necesaria para el accionamiento. Además, al ser menores las fuerzas de oposición, las fuerzas internas que han de soportar las diferentes partes de la máquina, también son menores, incrementándose la resistencia de los componentes frente al fenómeno de la fatiga de los cojinetes. (Sánchez, 2007)
- Reducir el desgaste: Cuando dos superficies están presionadas y poseen un movimiento relativo, se produce desgaste debido a la rugosidad superficial.

- Amortiguar impactos: El lubricante atrapado entre los cojinetes, permite apaciguar y disminuir las cargas dinámicas que se producen por inestabilidades del sistema. Tantas cargas axiales como radiales son disminuidas, esto también depende del tipo de cojinete utilizado.
- Transmitir potencia y señales: Los sistemas hidráulicos de aplicación de fuerzas se sirven de un fluido a presión para transmitir potencia entre diferentes puntos, así como señales que son convertidas físicamente en movimiento, tales como cierre de válvulas de control de procesos.

Como se observa, la utilización de un sistema de lubricación adecuado durante el funcionamiento de activos y sistemas mecánicos resulta imprescindible. Su mal funcionamiento o su falla de utilización se traducen en una gran cantidad de problemas que suelen derivar en un considerable gasto económico.

### **1.1.-Estados o Regímenes de lubricación.**

Se conoce como estado de lubricación a cada una de las posibles situaciones entre dos superficies que estén en movimiento relativo cuando existe un lubricante entre ellas.

Estos estados se clasifican en las siguientes categorías que se exponen a continuación:

#### **1.1.1.-Lubricación de película gruesa o completa.**

Es el estado ideal en el que la película de lubricante permanece gruesa en todo momento, previniendo el contacto entre las superficies. Cuando se logra este tipo de lubricación, la importancia del acabado superficial disminuye, porque lo único necesario es que el material resista las tensiones provocadas por el movimiento relativo y las fuerzas de compresión.

#### **1.1.2.-Lubricación límite y escasa.**

Son estados en donde coexisten dos fenómenos, un contacto superficial entre sólidos y la existencia de película de lubricante e los valles de la rugosidad superficial. En esta lubricación el efecto dinámico de sustentación es nulo y la carga es soportada íntegramente por el contacto metal-metal.

### **1.1.3.-Lubricación hidrostática.**

Ocurre cuando el lubricante es inyectado a presión en la zona de contacto, soportando las cargas e impidiendo el contacto entre las superficies, independientemente que haya un movimiento relativo entre ellas. Este tipo de lubricación tiene aplicaciones en diseños de cojinetes que están expuestos a grandes temperaturas, y que a su vez requieren grandes velocidades. Además, como el caudal de lubricación es alto, permite al sistema evacuar el calor que se genera por la fricción viscosa.

### **1.1.4.-Lubricación hidrodinámica.**

Corresponde a un estado similar al estado de película gruesa. En él, las presiones que el movimiento relativo produce en la película de lubricante de la interface son suficientes para mantener las superficies separadas, soportando la carga de los elementos a los que corresponden dichas superficies. En este estado, la forma y el movimiento relativo de las superficies es lo único que provoca la formación de una película de lubricante continua con la suficiente presión para soportar las cargas. Si el movimiento cesa, la película de lubricante se interrumpe dando lugar al contacto directo entre las superficies.

## **1.2.- Lubricación Hidrodinámica En Turbogeneradores.**

La teoría de lubricación hidrodinámica tuvo su origen en el laboratorio de Beauchamp Tower en los primeros años de la década de 1880. Este investigador estaba encargado de estudiar la lubricación en los cojinetes de los ejes de vagones de ferrocarril y de determinar el mejor método para lubricarlos. (Madrid U. C., 2006).

Tower obtuvo coeficientes de fricción muy bajos. Tras ensayar el cojinete, abrió un orificio en la parte superior para introducir nuevo aceite. Pero cuando puso en marcha el muñón, el aceite brotó por dicho orificio. Intentó taponarlo, primero con un tapón de corcho y luego de madera, pero en ambos casos fracasó, debido a que saltaba el tapón. Instaló un manómetro y comprobó que las presiones existentes eran muy elevadas, lo que permitía al cojinete soportar cargas muy elevadas.

El lubricante se adhería a las dos superficies y era impulsado por la superficie en movimiento hacia un espacio en forma de cuña con un estrechamiento progresivo, lo que daba origen a una presión en el fluido suficiente para soportar la carga del cojinete. (Osborne Reynolds).

Como se establece anteriormente, el régimen de lubricación hidrodinámica aparece entre dos superficies en movimiento relativo, en donde se produce un fenómeno dinámico de fluidos, que arrastra el fluido a un espacio convergente, creando una cuña de fluido a presión capaz de soportar la carga.

En las siguientes figuras podemos observar las fases de formación de la película hidrodinámica en un cojinete.

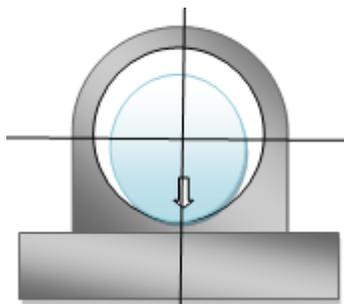


Figura N°1

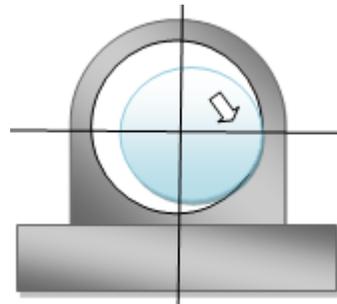


Figura N°2

En la figura N°1 el rotor está inicialmente en reposo, no hay movimiento relativo existente, por lo que tanto la superficie del rotor como la del agujero están en contacto metal con metal. Iniciándose el movimiento, estas superficies comienzan a desplazarse entre la olgura de la cavidad del descanso, como se muestra en la figura N°2, este procedimiento de partida es muy complejo y se requiere necesariamente de un monitoreo continuo de vibraciones, ya que el cojinete está diseñado para inicialmente tener este inconveniente.

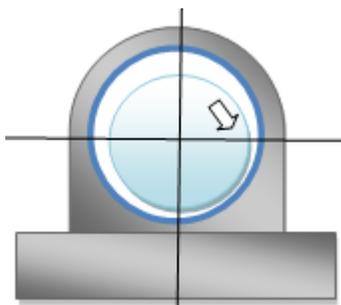


Figura N°3

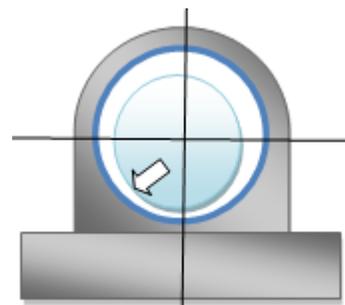
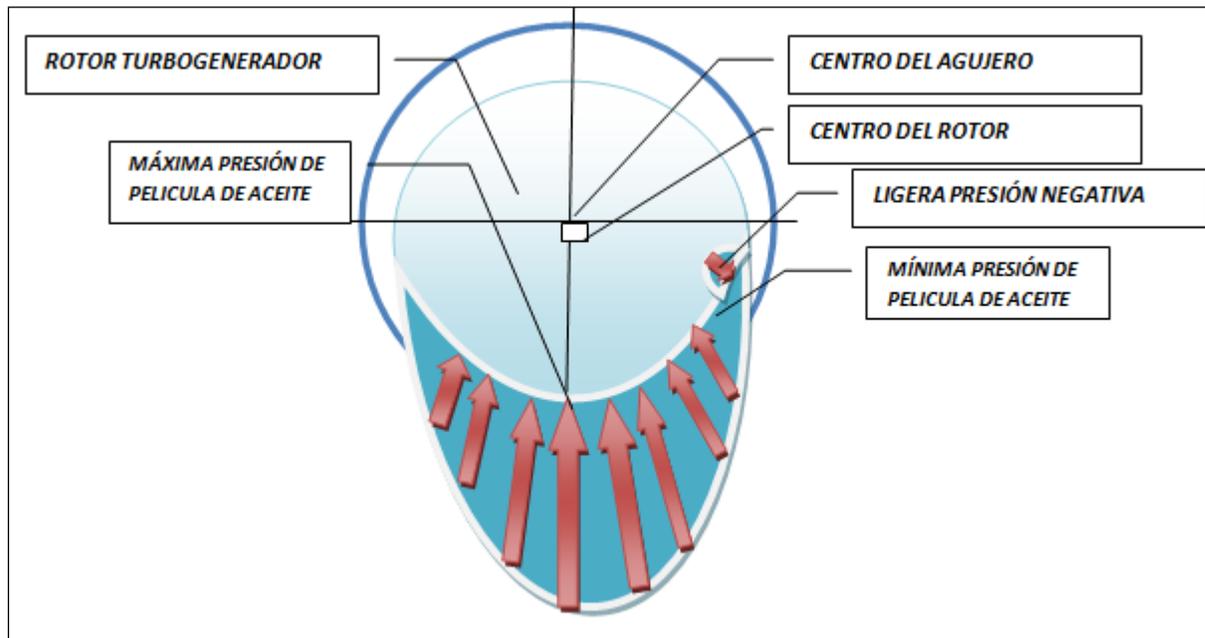


Figura N°4

Una vez que el rotor alcanza la velocidad determinada tal, que el aceite en los cojinetes produce un gradiente de presión en su holgura (rotor – agujero), el rotor se suspende por una ligera capa de aceite en donde la única fricción existente es entre rotor- aceite-agujero. En la figura N°4 el rotor está próximo a alcanzar la velocidad de trabajo permanente, aproximadamente 5000 rpm en turbinas a vapor.



*Figura N°1: Rotor a carga y velocidad normal (Granite, 2004).*

Se muestra el gradiente de presión que se genera cuando el rotor empieza a rotar. La disminución de la superficie en el agujero del cojinete genera un aumento de presión. Este gradiente de presión es proporcional a la velocidad de rotación del eje.

Las condiciones para que sea posible la formación de la película hidrodinámica son las siguientes:

- La holgura entre las superficies sea mayor que las rugosidades.
- Las superficies deben tener movimiento relativo.
- Las superficies no deben ser paralelas, idealmente cilíndricas o elípticas.
- El fluido lubricante debe ser viscoso y untuoso.
- Debe existir un sistema de lubricación forzado.

Los regímenes hidrostáticos trabajan con presiones de lubricante del orden de los de 1 a 10 MPa, En cambio, en régimen hidrodinámico esto no es necesario, ya que sus presiones de trabajo fluctúan

entre 100KPa a 400KPa, por lo que sólo necesitan un flujo continuo de lubricante. Se habla también de lubricación forzada, la cual se debe generar con un sistema apropiado.

### 1.3.- Cojinetes.

Un cojinete es un dispositivo que permite el movimiento relativo de uno o dos grados de libertad, impidiéndolo en los restantes, de forma que se minimice la pérdida de energía y el desgaste de los elementos.

Según los requerimientos cinemáticos de carga en los turbogeneradores son tanto axiales como radiales.



*Figura N°2: Fuerzas en cojinetes radiales y axiales.*

Estos cojinetes están formados por un metal antifricción llamado Babbitt o metal blanco, en donde la carga se transmite mediante partes no móviles, por deslizamiento, sin la ayuda de bolas o rodamientos.

En la siguiente figura se representan los rangos típicos de posibles condiciones de funcionamiento de tres tipos de cojinetes: fricción, hidrodinámicos y de elementos rodantes (Rodamientos).

Se demuestra que este tipo de cojinetes permite trabajar con diámetros elevados, sin depender de los elementos rodantes.

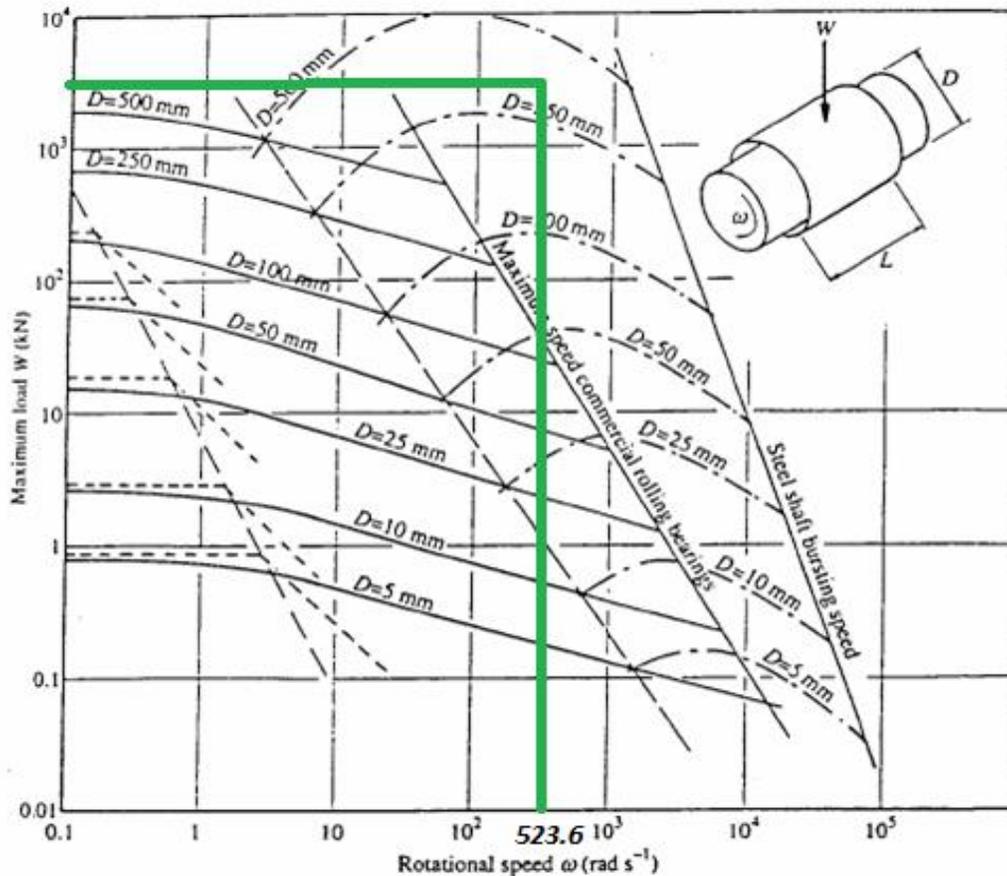


Figura N°3: Rangos Típicos de Posibles Condiciones de Funcionamiento para cojinetes, cojinetes de fricción (-----); cojinetes hidrodinámicos ( \_ . \_ ); rodamientos (\_\_\_\_);” (Madrid U. , 2007).

De la Figura N°3, se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de trabajo, los cojinetes de rodamientos o bolas quedan inhabilitados, ya que su inercia de movimiento les impide satisfacer dichas necesidades de diseño.

Para bajas velocidades de giro, los cojinetes de fricción pueden soportar cargas similares a los rodamientos, teniendo mayor capacidad de carga estos últimos al aumentar la velocidad de giro.

Los cojinetes hidrodinámicos soportan aún mayores cargas que los rodamientos para el mismo tamaño de cojinete, a partir de velocidades de giro que permitan mantener una película de lubricante.

Con respecto a la carga soportada, no se manifiesta demasiada diferencia entre el cojinete hidrodinámico y de rodamientos.

Habitualmente, la estructura del cojinete está construida en acero, fundición o bronce; y la parte donde existe fricción por deslizamiento se recurre con el metal babbitt. El metal blanco tiene elevada resistencia a la fricción con el aceite a presión, y en el caso de que, debido a una mala manipulación de la máquina, se rompa la película y el eje caiga sobre le metal babbitt, el eje no se daña y la capa de babbitt es de fácil reparación.



*Figura N°4: Cojinete radial de babbitt.*

### 1.3.1.-Aleaciones de metal Babbitt.

La aleación de metal babbitt o metal antifricción es el material base utilizado en descansos deslizantes. Babbitt es una aleación que según los requerimientos está compuesta básicamente de estaño, plomo, antimonio y cobre.

Esta aleación debe tener un límite elástico suficiente para evitar una deformación general, pero lo bastante bajo para permitir deformaciones locales, combinado con propiedades de resistencia a la fatiga tan elevadas como sea posible.

Pueden ser a base de estaño o plomo, siendo la primera mayor disipadora de calor y la segunda con una mayor resistencia a la corrosión por ácidos en el aceite.

Las composiciones químicas para aleaciones se rigen por la norma ASTM B23.

*Tabla N°1: Aleaciones estándares según norma ASTM B23.*

Base	Composición química (%)				Límite elástico (MPa) a 20°C	Dureza (HB)	
	Sn	Sb	Pb	Cu		20° C	100° C
Sn	90-92	4-5	0,35	4-5	16,9	17,0	8,0
Sn	88-90	7-8	0,35	3-4	23,1	24,5	12,0
Sn	83-85	7,5-8,5	0,35	7,5-8,5	36,9	27,0	14,5
Pb	9,3-10,7	14-16	72-75,5	0,50	17,2	22,5	10,5
Pb	4,5-5,5	14-16	77-80	0,50	18,3	20,0	9,5

Las carcasas de los cojinetes (soporte delantero y trasero), son independientes radialmente de carcasa exterior. El cojinete de deslizamiento hidrodinámico se inserta en anillos de soporte, que permiten la correcta alineación del cojinete en el eje de la máquina, por medio de elementos de ajuste. El cojinete delantero radial también actúa como un cojinete de empuje doble efecto, que tiene la misma capacidad de absorber el empuje del rotor axial residual en ambos lados. (Nuovo Pignone, 2006).

Por consecuencia, este tipo de cojinetes requiere de un sistema de lubricación que aporte fluido a presión y temperatura definidas.

Se presenta la siguiente tabla, con las cualidades de ciertos cojinetes para condiciones de trabajo.

*Tabla N°2: Sistema general de lubricación forzada.*

	<b>Tipo de Cojinete</b>			
	<b>Fricción</b>	<b>Hidrodinámico</b>	<b>Hidrostático</b>	<b>Rodamiento</b>
<b>Precisión de la posición radial</b>	aceptable	aceptable	excelente	buena
<b>Capacidad de la carga axial</b>	alguna	ninguna	ninguna	alguna
<b>Bajo par de arranque</b>	buena	aceptable	excelente	excelente
<b>Prestaciones a altas temperaturas</b>	Limitadas por los materiales	Limitadas por el lubricante	Limitadas por el lubricante	Buena. Limitadas por los materiales
<b>Sistema de lubricación requerido</b>	Simple	Requiere circulación	Complejo sistema de alta presión	Relativamente simple si hay estanqueidad
<b>Tolerancia a la suciedad</b>	Buena si hay estanqueidad	Requiere estanqueidad y filtrado	Estanqueidad y filtrado esenciales	Buena con estanqueidad

## **ANEXO II : ESPECIFICACIONES ACEITE PARA TURBOGENERADORES.**

### **2.-Propiedades de aceite para turbogeneradores.**

Se utilizan en sistemas de circulación forzada, donde sus funciones son lubricar y enfriar los cojinetes de la turbina y del generador. Estos lubricantes están continuamente expuestos a los efectos nocivos del calor y agua, que como consecuencia provocan el desgaste del metal. Estas condiciones aceleran la degradación del lubricante y provocan la aparición de corrosión y problemas derivados de la existencia de espuma en el lubricante.

Las funciones que debe cumplir un aceite en un turbogenerador son primordialmente, lubricar los cojinetes del grupo turbina-generador, enfriar los componentes, lubricar reguladores, transmitir impulsos y los mecanismos de control.

Las propiedades adecuadas para cumplir estos requerimientos son:

**2.1.- Viscosidad:** Corresponde a la capacidad del aceite para mantener su viscosidad ante cambios de temperatura. Ésta debe ser elevada, ya que en los rodamientos se alcanzan temperaturas aproximadas de 65°C en condiciones de operación normal. (Shell, 1958).

La viscosidad es la característica física más importante en los regímenes de lubricación hidrodinámica de los turbogeneradores, en donde el espesor de la película de aceite depende principalmente de esta característica. La carga en los cojinetes se encuentra muy bien distribuida, debido a la conformidad del cojinete con el eje y la alta velocidad, lo que favorece la formación de la cuña hidrodinámica.

Los fabricantes de turbogeneradores ponen mucho énfasis en la selección de la viscosidad adecuada que garantice el funcionamiento adecuado. Un cambio en la viscosidad puede dar lugar a un posicionamiento del rotor, tanto axial como radial, indeseado. Tales como el latigazo de aceite, cuya causa es el aumento de la viscosidad.

Las viscosidades de aceite utilizadas más comunes son:

*Tabla N°1: Propiedades para aceites de turbogeneradores.*

Aceite	Viscosidad	Limites viscosidad 40°C	
		Min	Max
	KV 40°C,mm <sup>2</sup> /s		
<b>ISO VG 32</b>	32	28,8	35,2
<b>ISO VG 46</b>	46	41,4	50,6
<b>ISO VG 68</b>	68	61,2	74,8
<b>ISO VG 100</b>	100	90	100

Los aceites más comunes en turbogeneradores son ISO 32, 46 y 68 aunque en algún caso pueden llegar a recomendar aceites ISO100.

Se debe tener en cuenta que la viscosidad no es un parámetro de calidad de aceite, pero si es un requisito imprescindible para asegurar un comportamiento correcto del sistema.

La temperatura máxima del aceite a la salida de los cojinetes está entre los 55y 70°C y a la salida del enfriador entre 44 y 45°C, nunca debe estar por debajo de los 38°C ya que la viscosidad aumentaría demasiado

Un aumento de la temperatura del aceite reduce la vida del aceite considerablemente, un aumento de 10°C en la temperatura del aceite reduce su vida a la mitad. (Arrhenius.1890.)

Los aceites comienzan a oxidarse rápidamente a temperaturas por encima de los 82°C.

**2.2.-Poder antioxidante:** El poder antioxidante es la capacidad del aceite para retardar su oxidación. La oxidación es una de las causas de las degradaciones mayores que sufre el aceite debido a que conlleva a la formación de lodos, barnices y depósitos, que aumentan la viscosidad y la formación de ácidos corrosivos. El poder antioxidante ayuda a establecer resistencia a la desemulsionalidad, resistencia a la formación de espuma y una buena desaireacion.

Entre los años 1994 y 1995 General Electric Frame encontró los filtros de aceite de 7 turbinas colmatados prematuramente. Se analizaron los filtros y encontraron ceras, geles y lodos. Las turbinas tenían entre 12000 y 15000 horas las mismas que los aceites y los cojinetes trabajaban a una temperatura de 121°C. Lo que ocurría era que a plena carga, el cojinete N°2 trabajaba un poco más

caliente 130°C. El aceite se enfriaba en el intercambiador y este proceso de calentamiento y enfriamiento rápido, daba lugar a la formación de ceras, lodos y precipitación de los aditivos. Este problema se agravaba cuando los niveles de contaminación acuosa eran mayores de 100 ppm. La solución al problema fue utilizar aceites con básicos de mayor calidad Grupo II, que pertenece a un aceite más refinado, teniendo mayor resistencia a los choques térmicos. (Terradillos, 2004).

La entrada de aire y agua, expuestos a alta temperatura, crean mejores condiciones para que se produzca la oxidación del aceite. Es por esto que el aceite debe ser lo más estable posible y poseer aditivos que destruyan los oxidantes.

**2.3.-Demulsibilidad:** Es la capacidad que tiene el aceite para evitar formar emulsión con el agua y mantenerla como agua libre separada. El agua en el aceite es dañina, ya sea mezclada o separada, pero es mucho más fácil eliminarla por medio de un sistema de extracción cuando está separada. Esta propiedad está aportada por aditivos, los cuales aumentan la tensión interfacial del aceite, obteniendo gotas grandes de agua, logrando separarse fácilmente del aceite.

Por lo que se hace muy necesario, debido a que el agua tiende a acumularse en el sistema proviniendo principalmente de la condensación del aire húmedo al final de las etapas, fugas en los sellos separadores o en el enfriador de aceite.

**2.4.-Poder antiespumante:** La característica antiespumante del aceite evita la tendencia a tomar aire en los sistemas agitados y la posterior formación de burbujas. El aceite posee aditivos que facilitan la liberación del aire, los cuales reducen la tensión superficial del aceite para provocar el colapso de la burbuja.

El aceite tiene mucha tendencia a este efecto, debido a la agitación, lo que provoca la formación de una película de aceite poco homogéneo e interferencia en la transferencia de calor.

**2.5.-Resistencia de película o capacidad de carga:** Es la capacidad del aceite para soportar cargas sin romper la película. Esta capacidad se ve mejorada con los agentes aditivos de resistencia de película, los cuales se concentran sobre la superficie metálica minimizando el contacto.

**2.6.-Punto de fluidez:** Es la temperatura más baja expresada como un múltiplo de 2.8°C, a la cual el aceite es observado fluir mientras es enfriado y examinado bajo condiciones prescritas. Este punto varía usando aditivos depresores, los cuales impiden la precipitación de los cristales de parafina contenidos en los aceites.

### **ANEXO III : NORMAS DE ACEITE PARA TURBOGENERADORES.**

#### **3.-Normas que deben cumplir los aceites para turbogeneradores.**

Debido a la criticidad de estos equipos, la gran mayoría tiene un programa de mantenimiento que surge con la necesidad de asegurar el adecuado funcionamiento de la planta, minimizando el riesgo e impacto económico de un paro prematuro.

La vida del aceite con respecto a la oxidación se mide en laboratorios bajo los siguientes métodos.

##### **3.1. - Rotating Pressure Vessel Oxidation Test (RPVOT) ASTM-D 2272.**

Es un método desarrollado para controlar los aceites de turbina en servicio, detectando la pérdida de la Resistencia a la oxidación. También denominada RBOT, en donde establece y enfatiza que los precursores de la oxidación suelen ser la temperatura y los contaminante tanto líquidos como el agua, sólidos como las partículas metálicas o gaseosos como el aire.

Cuando el aceite de turbinas se está degradando se forman ácidos orgánicos débiles y productos insolubles que se adhieren a la superficie de los cojinetes, válvulas, enfriador de aceite. (Terradillos, 2004).

Estos productos blandos inicialmente se convierten en más duros, provocando cambios en las holguras, desgastes y deficiencia en la refrigeración.

Este ensayo RPVOT es un test acelerado para identificar problemas de estabilidad a la oxidación de los aceites de turbinas en servicio. El valor obtenido no debe ser menor que el 85 % del valor inicial de aceite nuevo. Es importante resaltar que este test es para controlar la vida remanente de un aceite de turbinas en servicio, pero no es adecuado para comparar aceites. Se puede suponer que un aceite con mayor valor tendrá una mayor resistencia a la oxidación y por lo tanto una mayor vida en servicio.

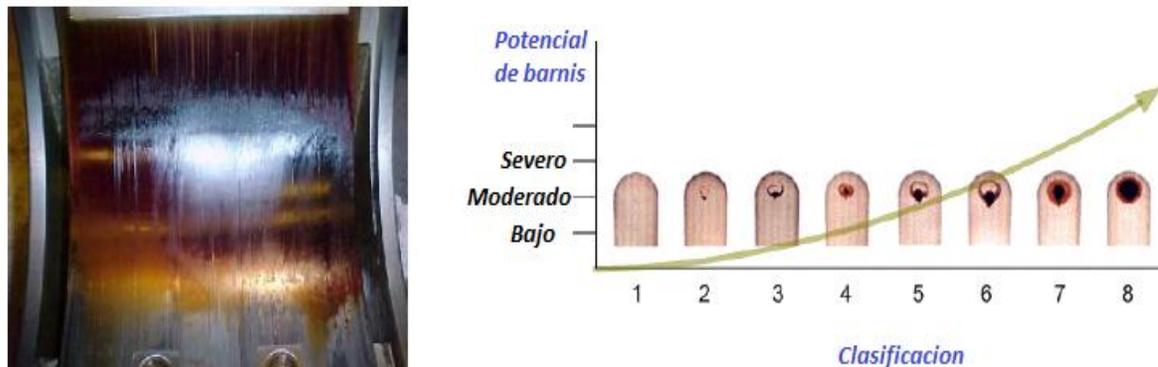


Figura N°1: Clasificación visual de sedimentación en cojinetes.

En la práctica, cuando se alcanza el valor limite del RPVOT del 25% del valor del aceite nuevo y no se puede parar la instalación lo que se suele hacer es lo que se conoce como “sangar y refrescar”, esto consiste en sacar un porcentaje de aceite y añadir la misma cantidad de aceite nuevo, con este procedimiento se consigue subir el índice, así la turbomáquina continúa trabajando hasta que se realice la parada programada.

### 3.2. -Turbine Oil Stability Test (TOST) ASTM-D943.

Este es otro ensayo para determinar la esperanza de vida de los aceites nuevos de turbinas. El ensayo se realiza inyectando oxígeno, agua y catalizadores metálicos al aceite, y determinando la formación de lodos y ácidos.

Los valores típicos de los aceites de turbinas convencionales superan las 2000 horas que marca la guía de mantenimiento para alcanzar un valor de AN de 2 mgr KOH/gr muestra. Hay productos minerales que alcanzan valores de hasta 10000 horas.

Este no es un ensayo de rutina de control del aceite en servicio. Es un ensayo de control de calidad. Se ha demostrado que no siempre hay una buena correlación entre estos ensayos RPVOT y TOST.

### 3.3. - Remaining Useful Life (RUL) ASTM-D 6810.

Este es un método que nos permite conocer la vida remanente de los aceites a través del control de los aditivos antioxidantes. La técnica se denomina Voltamperometría y nos proporciona la vida remanente en pocos minutos.

Esta es una técnica totalmente proactiva y se utiliza para controlar los aceites de turbina en servicio. A diferencia de los 2 ensayos anteriores, este es un test muy rápido y barato, lo que permite realizarlo con mayor frecuencia.

El instrumento RULER determina cuantitativamente la vida útil remanente del lubricante midiendo la concentración remanente de los antioxidantes. La velocidad de desgaste de los antioxidantes en el transcurso del tiempo puede ser monitoreada y utilizada para predecir los intervalos apropiados de cambio de aceite además de determinar operaciones anormales del equipo antes de que la máquina se estropee. La frecuencia recomendada es entre 1 y 3 meses.

### **3.4.- Contenido en agua (ASTMD 6304).**

El agua es uno de los principales enemigos de los aceites, esta se escapa a través de los sellos y otras fuentes creando emulsiones.

El aceite contaminado con agua y aire tiende a crear herrumbres. Esta herrumbre es abrasiva y ocasiona desgaste en los cojinetes, fallos en las válvulas etc.

Los niveles aceptables de contaminación acuosa son del orden de 0,1% (1000ppm) en tiempos antiguos, hoy en día, estudios han demostrado que esta concentración es devastadora para el aceite, por lo que se han propuesto disminuir a un 0,05% (500ppm), actualmente estos valores fluctúan entre 100 y 200 ppm.

La recomendación es realizar el ensayo de contaminación acuosa en aceites cada 3 meses como máximo.

### **3.5.-Limpieza (ISO 4406.99).**

Las holguras de los cojinetes son del orden de 10 a 20 micras y de las servo válvulas de control del orden de 3 a 5 micras, por lo que la limpieza del aceite se hace fundamental en estos equipos.

Un desgaste excesivo de los cojinetes o el agarrotamiento de las servo válvulas suele estar normalmente relacionado con un deficiente cuidado y limpieza del aceite.

La frecuencia de análisis recomendada es de entre 1 a 3 meses.

### **3.6.-Proteccion contra herrumbe y corrosión (ASTM-D665).**

El agua es uno de los principales enemigos de los aditivos que protegen el equipo de la herrumbre y corrosión. Generando lavados y compuestos corrosivos.

Las partículas de herrumbe actúan como catalizadores de oxidación y pueden provocar un desgaste abrasivo de los cojinetes. El nivel de aditivo anti herrumbre se suele mantener a travez de los añadidos de aceite.

El ensayo se realiza con agua destilada, considerándose como límite máximo cualquier indicio de herrumbre.

La frecuencia recomendada es anual en turbinas a vapor.

### **3.7.-Demulsionabilidad (ASTM-D 1041)**

Los aceites por lo general se separan muy rápidamente del agua. Sin embargo algunos aditivos que contrarrestan efectos de herrumbre y oxidación disminuyen el efecto de separación del agua. Esta es una de las razones de por qué las turbinas tienen muy poca cantidad de aditivos.

El ensayo de demulsionabilidad se realiza de acuerdo al método ASTM-D 1401 en el que se mezcla aceite con agua y se mide el tiempo que tarda el aceite en separarse del agua.

### **3.8.-Espuma (ASTM-D892).**

Los aceites de turbogeneradores contienen una pequeña cantidad de aditivos antiespumantes para provocar una rápida separación de aire.

El método de análisis es recomendado, pero puede arrojar un valor superior al que indica la norma o el fabricante, lo que significa que no necesariamente éste ocasionaría problemas, ya que en algunos casos, la línea de succión es lo suficientemente baja como para no absorber esa espuma inmediatamente. Los equipos de desaireación alcanzan a purificar el aire y volverlo a su estado normal.

Los valores limites que se establecen como parámetro son de 450 ml de formación después de 5 minutos de soplado y 10 ml de espuma de estabilidad.

Este ensayo es recomendable realizarlo una vez al año.



*Figura N°2: Espuma en depósito de turbogenerador.*

En general todas las normas mencionadas sirven como parámetro, cada fabricante y operador debe conocerlas y aplicarlas, como modo de mantenimiento preventivo proactivo. Así se asegura una vida alargada del aceite y del turbogenerador.

Se presenta a continuación un cuadro con el resumen de las Normas indicadas, sus respectivos parámetros y frecuencia de aplicación en turbogeneradores. Estos valores son referenciados de ASTM-D 4378-97 “In service monitoring of mineral turbine oil for steam”.

*Tabla N°1: Normas para aceite de turbogeneradores.*

<b>Parámetro</b>	<b>Método Norma</b>	<b>Rango critico</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Viscosidad</b>	ASTM-D445	+/- 5%	1-3 meses
<b>RPVOT</b>	ASTM-D2272	25%	anual
<b>RULER</b>	ASTM-D6810	25%	1-3 meses
<b>Agua</b>	ASTM-D6304	100ppm	1-3 meses
<b>Limpieza</b>	ISO4406.99	18/16/15	1-3 meses
<b>Herrumbre</b>	ASTM-D665	Cualquier indicio	anual
<b>Desemulsionabilidad</b>	ASTM-D1401	3 minutos	anual
<b>Espuma</b>	ASTM-D892	450ml/10 min	anual

## **ANEXO IV: ANALISIS HAZOP A SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE EMERGENCIA.**

### **IV.1- Análisis área de diseño.**

Para el análisis se consideró el uso de desviaciones para cada nodo. Tales fueron obtenidas de modos de falla comunes, con el apoyo de la norma ISO 14224. Posteriormente se evaluaron las correspondientes causas de las desviaciones, pertenecientes a los mecanismos de falla.

Un aspecto importante en el análisis son las consecuencias y las medidas correctoras propuestas a cada desviación, con el fin de fundamentar y aclarar el funcionamiento del sistema.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación.</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
1	Separar	no	ID1	Filtrar partículas de mayor tamaño, sobre 40 micrones.	Soltura o corte de pernos fijación filtro, quedando espaciamiento libre.	Desgaste leve en elementos rotatorios tales como tornillos de bomba vertical, abrasión pequeña en válvulas.	Mantenimiento preventivo de unidad de succión de bomba de emergencia.
2	Presión	no	ID2	Genera presión de levante.	Eje de bomba roto o chaveta dañada.	Pérdida de lubricación forzada. Los cojinetes no son enfriados ni lubricados eficientemente, provocando el agarrotamiento, dañándolos seriamente.	Mantenimiento preventivo de bomba. Esta falla es poco probable, generalmente sucedería después de una mantención general en la cual se intervino todo el sistema.
2	Presión	menos	ID3	Genera presión de levante.	Desgaste de engranajes verticales.	La presión de salida de la bomba desciende, provocando que la presión aguas abajo en el conducto (19) descienda y por consecuencia la presión en los cojinetes. Sin embargo la posible pérdida de cuña hidrodinámica es poco frecuente.	Mantenimiento preventivo de bomba. En caso de suceso, la válvula reguladora (retorno) se cierra gradualmente manteniendo la presión en los cojinetes. El tiempo para reemplazar la bomba es de 24 horas.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
2	Presión	Menos	ID4	Genera presión de levante.	Pernos acople cortados.	La presión de salida de la bomba desciende por debajo de 90 KPa, provocando que la presión aguas abajo en el conducto (19) descienda y por consecuencia la presión en los cojinetes. Pérdida de cuña hidrodinámica.	Mantenimiento preventiva de bomba. En caso de suceso, la válvula reguladora (retorno) se cierra gradualmente manteniendo la presión en los cojinetes. El tiempo para reemplazar la bomba es de 30 horas.
2	Caudal	No	ID5	Impulsa fluido al sistema de emergencia durante la secuencia de detención	Eje de bomba roto o chaveta mal colocado.	No se suministra aceite a los cojinetes calientes, lo que implica una pérdida total de lubricación forzada. Mientras se va deteniendo no enfría ni se lubrica. Esto puede provocar el agarrotamiento o el daño severo de los cojinetes.	Requiere una reparación completa de la turbina.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
3	Caudal	No	ID6	Flujo de aceite de emergencia .	Desacople flange unión salida aguas arriba.	Al desacoplarse el flange, la continuidad de la línea 3 queda inhabilitada para conducir el aceite hacia los enfriadores, luego a los filtros y consecuentemente a los cojinetes turbina generadora y reductora. Perdiendo la lubricación forzada en el sistema.	Las fallas repentinas en las juntas se consideran poco probables y en caso de suceder poseen un acceso rápido.
3	Caudal	Menos	ID7	Flujo de aceite de emergencia .	Obstruida por objeto extraño	Esta falla se sabe que ha ocurrido cuando se olvido algo en el sistema de lubricación luego de mantenimiento. Durante la partida no se alcanzan los 140 KPa requeridos en el arranque, por lo que el arranque es abortado.	Esta falla es poco probable de ocurrir, y en caso de ocurrencia puede tomar hasta 8 horas localizar y remover la obstrucción. Esta es identificada por instrumentos de boroscopia.
4	Actúa	No	ID8	Ausencia total de giro	No hay alimentación de energía continua.	El motor eléctrico DC al no tener suministro de energía queda inhabilitado. Como consecuencia la bomba (3) no es accionada no impulsando aceite de emergencia a los cojinetes, perdiendo la cuña hidrodinámica. Daño de rodamientos.	Revisar periódicamente el accionamiento del generador y cerciorarse de que esta en las condiciones requeridas para una partida inmediata.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
4	Actúa	Menos	ID9	Giro lento	Bajo par de tensión.	La bomba (3) es accionada por el motor eléctrico DC que al ser alimentado con un par de baja tensión (menos que 380 V) el motor parte pero no alcanza la velocidad de giro necesaria para alimentar la bomba. No incorporando el aceite a la presión de 100 KPa en caso de emergencia.	Revisar periódicamente el accionamiento del banco de baterías y cerciorarse de que esta en las condiciones requeridas para una partida inmediata.
5	Corriente	No	ID10	Ausencia de partida inmediata.	Batería DC de arranque descargada	El equipo para su partida inmediata posee un sistema automático alimentado por una batería de DC de 12 V y 100 Amp. Al estar descargada no incorpora el arranque suficiente para la partida del generador, impidiendo que el sistema en cadena funcione.	Revisión periódica de batería.
5	Corriente	Menos	ID11	Generación de tensión baja, impidiendo partida de motor AC de emergencia	Motor de generador en condiciones frías.	El motor generador debe tener una temperatura de aceite interior sobre los 25°C para que al momento de partida inmediata estas funciones de aceleración, propias de un motor frío.	Revisión periódica a equipo pre calentador del generador.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
6	Actúa	No	ID12	Evacua en caso de sobrepresión	Incrustaciones anómalas en las paredes y superficie de sello partículas metálicas. Formación de barnices.	Sobrepresión en conducto aceite de emergencia (3).	Cambiar válvula.
6	Conserva	No	ID13	Actúa sin existir sobrepresión.	Rotura del regulador	Fuga de caudal hacia el estanque por conducto de retorno, disminuyendo la presión de conducto lubricación aceite de emergencia. (3)	Cambiar válvula.
7	Actúa	No	ID14	Sin registro de caudal de retorno.	Agarrotamiento de elementos producto de incrustaciones.	Sistema retorno sin indicaciones, provocando potenciales errores de operaciones.	Cambiar elemento.
9	Caudal	No	ID15	Retorno de fluido	Agripamiento de resorte regulador	Variaciones de caudal y presión en línea lubricación de emergencia.	Mejorar mantenimiento preventivo de válvulas.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>9</b>	Presión	Menos	ID16	Presión de aceite lubricación emergencia	Válvula trabaja en posición abierta por objeto extraño.	El aceite recircula por la bomba emergencia (2) en lugar de ser bombeado aguas arriba. La presión de aceite baja. Una válvula de sistema de control (retorno) se cierra gradualmente manteniendo presión en los cojinetes.	Mantenimiento y revisión de válvulas. Tiempo para cambiar la válvula es de alrededor 4 horas.
<b>11, 12</b>	Presión	Menos	ID17	Indicaciones de diferencial de presión en filtro stand-by.	Agripamiento por sedimentación en elemento separador válvula.	Imposibilidad de separar el 100 % del flujo aceite hacia el filtro en operación, implicando que ambos filtros estén trabajando. Esto imposibilita intervenciones en el filtro stand-by.	Mejorar limpieza de fluido.
<b>11, 12</b>	Actúa	No	ID18	Atascamiento al intervenir.	Agripamiento de bola y vástago interior.	No se puede proceder a cambiar filtros en caso de que el diferencial de presión exceda los 100KPa. No manteniendo la continuidad de la lubricación.	Mejorar limpieza de fluido.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
13, 14	Presión	Mas	ID19	Diferencial de presión sobre 100 KPa.	Obstrucción de elemento filtrante debido a sedimentos.	La presión diferencial a través del filtro aumenta, lo cual es acusado por el manómetro (15). La presión aguas abajo del filtro decae de 340 KPa hasta los 240 KPa. Se envía un serial de partida, accionando la bomba stand-by del sistema de lubricación principal cuando la velocidad de giro del rotor cae por debajo de 1300 rpm en turbinas de 3000 rpm, y a 2000 rpm en turbinas de 5000 rpm, sin embargo la bomba auxiliar también esta aguas arriba del filtro tapado, por lo tanto tampoco puede entregar una presión superior a 240 KPa. Continúa bajando la presión y en seguida se envía un serial a la bomba de emergencia (2) para completar el suministro de aceite a los cojinetes de la turbina, sin embargo esta bomba también esta aguas arriba del filtro tapado. Finalmente de ninguna forma se logra restituir la presión en los cojinetes turbina-generador y caja reductora.	Cambiar flujo de aceite hacia filtro Stand-by para asegurar el flujo continuo de aceite. Posteriormente cambiar elemento filtrante obturado.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>13,14</b>	Actúa	Menos	ID20	Aceite conteniendo partículas mayores a 25 micrones a cojinetes y caja reductora.	Perdida de tuerca mariposa malla filtro.	El filtro es saltado de su posición original y la presión diferencial cae a cero en (15). Se considera que las partículas mayores a 25 micrones pasan el filtro, lo cual aceleraría el proceso de desgaste de los cojinetes y caja reductora.	Esta falla es poco probable, y se considera hipotética luego de una intervención de cambio de elemento filtrante. Sin embargo para asegurar el flujo continuo de aceite existe el filtro stand-by.
<b>13,14</b>	Actúa	No	ID21	Aceite conteniendo partículas mayores a 25 micrones a cojinetes y caja reductora.	Malla elemento filtrante rota.	La malla o elemento filtrante está diseñada para soportar presiones de hasta 970 KPa, y la apertura de las válvulas de alivio se realiza a los 620 KPa, lo que significa que solo se pueden romper por un error de operación.	En caso de ocurrencia se cuenta con el filtro stand-by. Asegurando la continuidad de la lubricación forzada.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>13,14</b>	Viscosidad	Menos	ID22	Disminución significativa de diferencial de presión.	Agentes externos al aceite tales como agua producto del vapor de cello.	Lectura errónea del diferencial de presión, por ende, se asume erróneamente que el elemento filtrante no está sucio.	Realizar muestreo periódico de aceite en estanque.
<b>15</b>	Presión	No	ID23	Sin indicación de diferencial de presión.	Entrada de aceite medidor obturada.	Lectura errónea del diferencial de presión, por ende, se asume erróneamente que el elemento filtrante no está sucio.	Revisar periódicamente.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
16	Presión	Menos	ID24	Variaciones significativas de presión en descansos y reductor.	Regulador de presión del sistema principal en posición abierta.	El aceite retorna al estanque principal, mientras tanto la presión disminuye hasta los 240KPa, se envía una señal de "baja presión de aceite de lubricación". La bomba auxiliar ingresa cuando la velocidad de la turbina cae por debajo de 1300 rpm en turbinas de 3000rpm, y a 2000rpm en turbinas de 5000rpm, para restituir la presión a 340KPa. Sin embargo la bomba auxiliar comparte (16) por lo que tampoco puede entregar una presión superior a 240 KPa. Sigue bajando la presión hasta que se envía un serial de partida para la bomba de emergencia con el fin de complementar el suministro de 100 KPa a los cojinetes y caja reductora. Sin embargo la bomba de emergencia también comparte el mismo conducto aguas arriba (16) por lo que tampoco logra establecer la presión. Finalmente de ninguna forma se logra restituir la presión en los cojinetes turbina-generator y caja reductora.	Revisar periódicamente sistema (16). En caso de ocurrencia el tiempo de parada para diagnosticar y reemplazar es de 4 horas.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>16</b>	Caudal	Otros	ID25	Abruptas variaciones de caudal	Complejo válvulas en mal estado, agripadas debido a sedimentación en el fluido	La inestabilidad de la película de aceite causa pequeñas vibraciones radiales y axiales, asociadas a los cojinetes. Sin embargo la pérdida de la cuña hidrodinámica en descansos turbina generador es físicamente poco probable.	Revisar periódicamente
<b>17</b>	Volumen	Menos	ID26	Insuficiencia de aceite para succión, no alcanzando el nivel mínimo.	Perdidas por soldaduras debidas a corrosión.	El aceite se derrama entre las uniones manto piso, disminuyendo su nivel, a su vez las bombas pueden funcionar en vacío, imposibilitando a (2) impulsar fluido, no llegando aceite de emergencia a los cojinetes turbina-generador y caja reductora.	Revisar periódicamente nivel de estanque y rellenar con aceite ISO VG 32.
<b>17</b>	Volumen	Menos	ID27	Insuficiencia de aceite para succión, no alcanzando el nivel mínimo.	Fallo sensor de nivel.	Lectura errónea.	Cambiar medidor de nivel.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>18</b>	Presión	No	ID28	No existe presión de fluido	Falla en bomba principal y bomba auxiliar en operación normal.	Al fallar las bombas principal y auxiliar en operación normal, la presión en (18) disminuye radicalmente de 340 KPa a 0. A los 240 KPa inmediatamente se envía un serial de baja presión accionando la bomba de emergencia, la cual eleva la presión a un máximo de 100 KPa, por diseño. Esta presión basta para mantener la lubricación de los cojinetes en caso crítico.	Se procede a verificar la falla de las bombas principal y auxiliar. Si la falla es solucionable a la brevedad, la turbina se mantiene en giro lento. Por el contrario se debe proceder a su detención.
<b>18</b>	Presión	Menos	ID29	Disminución de presión de fluido	Obstruida por objeto extraño	Esta falla se sabe que ha ocurrido cuando se olvido algo en el sistema de lubricación luego de mantenimiento. Durante la partida no se alcanza la presión de 140 KPa requeridos en el arranque, por lo que el arranque es abortado.	Esta falla es poco probable de ocurrir, y en caso de ocurrencia puede tomar hasta 8 horas localizar y remover la obstrucción. Esta es identificada por instrumentos de boroscopia.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>19</b>	Presión	Menos	ID30	Suministro de aceite a presión a cojinetes turbina generador y caja reductora.	Falla junta de tuberías aguas abajo cercanas a la turbina.	El aceite se dispersa sobre el piso. La presión disminuye hasta los 240 KPa en donde se enciende la bomba de emergencia. Sin embargo esta tampoco puede entregar aceite a través de la tubería averiada, por lo que se pierde la cuña hidrodinámica no lubricando los cojinetes causando el agarrotamiento o un daño severo.	Las fallas repentinas en las juntas se consideran poco probables y en caso de suceder poseen un acceso rápido.
<b>20</b>	Temperatura	no	ID31	Precalienta aceite de lubricación.	Falla conexión o suministro energía eléctrica	El aceite no logra alcanzar la temperatura inicial de trabajo correspondiente a 35-38°C. Esto provoca un aumento leve de la viscosidad, que a su vez impide el desplazamiento eficiente del aceite a través del filtro para su limpieza. Este efecto principalmente en una secuencia de arranque de la turbina ya que la viscosidad no permite alcanzar la presión de 140 KPa mínima para proceder.	Su ocurrencia es muy poco probable. Para prevenir se debe hacer un chequeo preventivo del estatus del pre calentador.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
21	Separar	No	ID32	Aceite con demasiado vahos en su composición	Sistema de extracción en mal estado.	Al no separar los vahos del aceite producidos principalmente por fugas propias en los sellos de la turbina y la agitación propia del sistema provoca una ligera cavitación en la bomba, vibraciones, interferencias en la formación de la cuña hidrodinámica en los cojinetes. En el lubricante la presencia de vahos provoca una aceleración del proceso de oxidación del aceite.	Mejorar mantenimiento preventivo. Además de aplicar análisis de aceite según norma ASTM-D 2272.
21	Actúa	No	ID33	Incapaz de ventear aire de estanque hacia la atmosfera.	Venteo de aire bloqueado por material extraño.	El estanque debe estar a presión atmosférica para permitir que pequeñas cantidades de aire fluyan hacia afuera a través de los sellos de la turbina. Si el venteo está tapado, el flujo de aire hacia afuera se detiene y el aceite entra en la turbina afectando a los alabes, reduciendo el rendimiento de la turbina.	Esta falla es poco probable, sin embargo se puede prevenir mejorando el mantenimiento preventivo.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
22	Presión	Menos	ID34	Presión de aceite en el complejo cojinetes turbina generador y caja reductora.	Falla junta de tuberías aguas arriba hacia filtros dúplex (13) y (14).	El aceite se dispersa sobre el piso. La presión de aceite cae por debajo de los 240 KPa. Inmediatamente la bomba auxiliar ingresa cuando la velocidad de giro del rotor sea menor a 1300 rpm elevando la presión a 340 KPa. Sin embargo la bomba auxiliar también esta agua arriba de la junta de las tuberías fallada, por lo tanto tampoco puede entregar una presión superior a 240 KPa. Se envía un serial de partida a la bomba de emergencia (2) de tal modo de aumentar la presión en los cojinetes. Sin embargo la bomba de emergencia (2) también tiene en común el conducto aguas arriba por lo que le es imposible aumentar la presión. Finalmente de ninguna forma se logra restituir la presión en los cojinetes turbina-generador y caga reductora, generando un tripeo.	Mejorar diseño de instalación. Las fallas repentinas en las juntas se consideran poco probables, y se piensa que la mayoría de tales fallas irán precedidas de pequeñas perdidas.

## **IV.2- Análisis área operatividad.**

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16.	Planeación	No	ID1	Programa de mantenimiento.	Error área administrativa.	No se lleva a cabo el mantenimiento.	Se debe elaborar de forma oportuna un programa de mantenimiento preventivo.
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	Planeación	No	ID2	Programa de mantenimiento.	No se entrego en tiempo ni forma.	Se realiza el mantenimiento sin el programa de mantenimiento.	Encargado del equipo técnico de mantenimiento deberá evaluar la situación. Posteriormente se debe cerciorarse de contar siempre con el programa de mantenimiento a tiempo y forma.
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	Procedimientos	No	ID3	No se proporciona la documentación adecuada sobre que hacer durante las tareas de revisión rutinarias o mantenimiento en el estado de pre-puesta en marcha, puesta en marcha, operación normal y parada.	El área a cargo no cuenta con los procedimientos	La falta de información establecida provoca la que la realización de la mantención dependa exclusivamente de la experiencia del operador.	El procedimiento debe estar estandarizado y accesible a todos los operadores encargados del área.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	Procedimientos	No	ID4		Se tienen pero no se entregaron en tiempo y forma correcta.	Se realiza el mantenimiento sin el programa de mantenimiento.	
6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	Capacitación	No	ID5	No se proporciona la capacitación adecuada al personal para realizar las tareas rutinarias y mantenimiento.	Falta de coordinación y comunicación.	El operador no sabe interpretar las instrucciones de manera correcta, lo que puede inducir a daños en las instalaciones como también a la pérdida de la continuidad de la lubricación en los cojinetes.	Mantener una coordinación y comunicación muy estrecha con los operadores del área involucrados. Esto implica que antes de realizar un procedimiento de intervención a los equipos, exista una breve charla 5 minutos donde se especifican los objetivos, riesgos y consecuencias.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16</b>	Capacitación	No	ID6	No se proporciona la capacitación adecuada al personal para realizar las tareas rutinarias y mantenimiento	No existe la inducción o curso adecuado	Realizan las actividades de manejo de válvulas y mantenimiento con experiencia propias, esto produce intervenciones o actos inseguros y que pueden terminar en consecuencias más graves.	El encargado del área debe cerciorarse que el operador sepa cuáles son los estándares de funcionamiento normal de los equipos, como también los fundamentos teóricos que lo respalden.
<b>12, 13</b>	Planeación	No	ID7	Programa de mantenimiento.	Error área administrativa.	No se lleva a cabo el mantenimiento.	Se debe elaborar de forma oportuna un programa de mantenimiento preventivo.
<b>12,13</b>	Planeación	No	ID8	Programa de mantenimiento.	No se entrego en tiempo ni forma.	Se realiza el mantenimiento sin el programa de mantenimiento.	Encargado del equipo técnico de mantenimiento deberá evaluar la situación. Posteriormente se debe cerciorarse de contar siempre con el programa de mantenimiento a tiempo y forma.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
12,13	Procedimientos	No	ID9	No se proporciona la documentación adecuada para realizar las mantenciones periódicas.	El área a cargo no cuenta con los procedimientos adecuados.	La falta de información establecida provoca la que la realización de la mantención dependa exclusivamente de la experiencia del operador. Una de las intervenciones más frecuentes es el cambio del elemento filtrante. Este procedimiento se realiza cuando el diferencial de presión es mayor a 100 kPa. Esta operación debe realizarse con extrema precaución en sistemas ya que se puede perder la continuidad de la lubricación.	El procedimiento debe estar estandarizado y accesible a todos los operadores encargados del área.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
12,13	Procedimientos	No	ID10	No se proporciona la documentación adecuada para realizar las mantenciones periódicas.	Se tienen pero no se entregaron en tiempo y forma correcta.		
12,13	Capacitación	No	ID11	No se proporciona la capacitación adecuada al personal para realizar las tareas rutinarias y mantenimiento.	Falta de coordinación y comunicación.	El operador no sabe interpretar las instrucciones de manera correcta, lo que puede inducir a daños en las instalaciones como también a la pérdida de la continuidad de la lubricación en los cojinetes.	Mantener una coordinación y comunicación muy estrecha con los operadores del área involucrados. Esto implica que antes de realizar un procedimiento de intervención a los equipos, exista una breve charla 5 minutos donde se especifican los objetivos, riesgos y consecuencias.

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>ID</i>	<i>Desviación.</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
<b>12,13</b>	Capacitación	No	ID12	No se proporciona la capacitación adecuada al personal para realizar las tareas rutinarias y mantenimiento.	No existe la inducción o curso adecuado	Realizan las actividades de manejo de válvulas y mantenimiento con experiencia propias, esto produce intervenciones o actos inseguros y que pueden terminar en consecuencias más graves.	El encargado del área debe cerciorarse que el operador sepa cuáles son los estándares de funcionamiento normal de los equipos, como también los fundamentos teóricos que lo respalden.

**IV.3.- Hazop desarrollado para el sistema de lubricación de emergencia planta Valdivia, aplicado a los nodos designados como intercambiadores de calor.**

<i>Nodo.</i>	<i>Variable.</i>	<i>Palabra guía.</i>	<i>I.D</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causas posibles de desviación</i>	<i>Consecuencias posibles.</i>	<i>Medidas correctoras.</i>
23, 24	actúa	No	ID34	Atascamiento al intervenir.	Válvulas carcasa enfriador agarrotadas por corrosión	Esto se produce por que los vástagos de las válvulas no se engrasan y finalmente se agarrotan. Esto hace imposible cambiar de enfriador cuando la temperatura de aceite aumente.	El engrase está a cargo del mecánico de área y se realiza según procedimiento estandarizado. En caso de ocurrencia la turbina debe ser detenida para hasta que las válvulas sean destrabadas o cambiadas.

<p><b>25, 26</b></p>	<p>Temperatura</p>	<p>No</p>	<p>ID35</p>	<p>Enfría aceite lubricación.</p>	<p>Falla sistema de enfriamiento del agua de refrigeración.</p>	<p>La temperatura de aceite de lubricación se eleva desde los 45°C hasta los 60-65°C.  En estos rangos de temperatura el operador cambia al enfriador stand-by para lograr enfriar el aceite, pero el enfriador stand by tiene en común el sistema de enfriamiento de agua por lo que la temperatura de aceite sigue aumentando. A los 71°C el sistema de control detiene automáticamente la turbina.</p>	<p>Realizar mantención preventiva al sistema de enfriamiento de agua de refrigeración. Esta falla es poco probable, ya que el rango de temperaturas del agua de refrigeración varía entre 25-30°C, en condiciones ambientales normales.</p>
--------------------------	--------------------	-----------	-------------	-----------------------------------	---	---	---

<p><b>25, 26</b></p>	<p>Temperatura</p>	<p>Menos</p>	<p>ID36</p>	<p>Enfría aceite lubricación.</p>	<p>Tubería enfriador obstruida por lodo o incrustaciones, sedimentos, o capa aislante en el exterior de los tubos de agua.</p>	<p>En cañerías fluye menos agua refrigerante, lo que provoca una ineficiencia afectando la transferencia de calor. El aceite eleva su temperatura de trabajo desde los 45°C hasta los 60-65°C. En estos rangos de temperatura, el aceite disminuye su viscosidad, como también aumentan las posibilidades de oxidación, creación de barnices en los cojinetes.etc.</p>	<p>El operador procede a cambiar al enfriador stand-by mediante la válvula tres vías (24) (25), manteniendo así el flujo continuo de aceite no alterando la lubricación forzada. Luego se procede a limpiar las tuberías obstruidas.</p>
--------------------------	--------------------	--------------	-------------	-----------------------------------	--	--	--

## Bibliografía

- Belloví, M. B. (2008). *Evaluation de dangers et d'operabilité des procedés*.
- Flores, J. R. (2003). *Identificación y evaluación de Hazop*. Prevention-World.
- Granite. (2004). *Manual Proveedor*.
- Madrid, U. C. (2006). *Lubricación*. Madrid.
- Madrid, U. (2007). *Diseño de Maquinas*.
- MAN, T. (2003). *IOM Manual*. Oberhausen: Germany.
- Montiel, J. (1999). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona.
- Mounbray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Aladon LLC.
- Nuovo Pignone, E. (2006). *Manual de operación y mantención*. ITALIA.
- Pérez, C. M. (2004). Confiabilidad y Evolución del mantenimiento. *Soporte & cia* .
- S.A, C. A. (2011). Memoria Arauco.
- Sánchez, F. (2007). *Mantenimiento mecánico* . Universitat Jaume.
- Shell. (1958). *The lubrication of steam turbines*.
- Terradillos, J. (2004). Todo sobre la lubricación de las turbinas y su mantenimiento atravez del analisis del aceite. *wearcheckiberica* .
- Troyer, D. (2010). "Ingenieria de Factores Humanos" La proxima frontera de la confiabilidad. *Machinery Lubrication* .



