

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTAMARIA  
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**PROPUESTA DE MEJORA OPERACIONAL A SISTEMA DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

Trabajo de Titulación para optar al Título de  
Ingeniero/a en MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL.

Alumno:

Bastían Yeremías Espinoza Díaz

Profesor Guía:

Mg. Ing. Cristian Cuadra Urbina

**2024**

**DEDICATORIA.**

*Agradezco a Dios por estar conmigo en todo momento de mi vida y ayudarme a salir adelante en los peores momentos.*

*Agradezco a mis padres Marisol y Marcelo que sin ellos nada de esto sería posible, ellos me brindaron la vida y día a día me dan motivos para disfrutarla y vivirla, gracias por todo lo que han hecho por mi papá y mamá.*

*Agradezco a mi hermana Aracelly por siempre hacerme reír y mantener alegre la casa.*

*Agradezco a mis tatas por todo el conocimiento que han aportado en mi crecimiento y que hasta el día de hoy tienen consejos y enseñanzas a sus nietos.*

*Agradezco a mi tío Esteban, el mejor tío del mundo.*

*Agradezco a Salome, desde el día que nos conocimos has sido una luz que día a día me ha iluminado y ayudado a seguir adelante, no bajar los brazos en los momentos complicados y a no rendirme.*

*Agradezco a mis amistades Constanza, Kijara, Felipe, Axel, Paula y Javiera por ser los mejores amigos que pude tener y por todos los grandes momentos que hemos vivido.*

*Agradezco a los profesores que en toda mi enseñanza han aportado con su conocimiento y enseñanzas al crecimiento no solo mío sino de tantos profesionales jóvenes y adultos.*

*Agradezco a mis compañeros de Universidad Manuel, Mauricio, Sergio, Nicolas y Constanza, con quienes realizamos cuanto trabajo y actividades, por acogerme en su grupo y crear una gran amistad, gracias muchachos.*

*Finalmente le agradezco a todas las personas que han cruzado por mi vida y me he cruzado por la suya, a todos quienes me han brindado buenas vibras a mí ya mi familia, de corazón a todos muchas gracias.*

**RESUMEN**

PALABRAS CLAVE: DIAGNOSTICO, ANÁLISIS, EVALUACIÓN.

La industria energética a nivel nacional está fuertemente influenciada por las energías renovables, principalmente por las plantas solares fotovoltaicas, los parques eólicos y las centrales hidroeléctricas. La importancia de utilizar energía verde como electrificación en la industria y los hogares implica en reducir los gases de efecto invernadero y la contaminación al medio ambiente.

En el actual trabajo investigativo se desarrolla en la central hidroeléctrica Hornitos perteneciente a la empresa Colbún S.A, principalmente la unidad generadora Hornitos, ubicada en la cuenca del Aconcagua en la región de Valparaíso.

La finalidad del trabajo es desarrollar una propuesta de mejora operacional de la unidad generadora tomando como base de estudio el historial de los últimos 4 años de funcionamiento de la unidad generadora con tal de mantener una alta disponibilidad y confiabilidad, y buscar disminuir los costes por falla.

La propuesta es desarrollada en base a un proceso de diagnóstico del estado actual de la unidad considerando los sistemas y subsistemas más críticos, según lo obtenido por matrices de criticidad en base a opinión de trabajadores, en conjunto con ordenamiento de datos como frecuencia de falla, tiempo promedio de reparación, modos, efectos y consecuencia de fallas englobados por un cuadro FMEA.

Para el análisis se consideran las fallas de mayor recurrencia e impacto, determinado por diagrama Ishikawa y la metodología “5 por que” para determinar de manera óptima las distintas formas en que pueden ocurrir las fallas en conjunto con el planteamiento de distintas soluciones.

Por último, se realiza una evaluación económica comparando los costes por falla, que considera costos por indisponibilidad y costos directos por falla (determinados por la Comisión Nacional de Energía), con los costes de la propuesta de mejora, además se propone un escenario futuro comparado con el escenario actual determinando un posible ahorro en caso de ser implementada la propuesta.

ÍNDICE DE TÍTULOS.

DEDICATORIA.....	II
SIGLAS.....	1
GLOSARIO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
CAPÍTULO 1.    ANTECEDENTES GENERALES.....	4
1.    CONTEXTO OPERACIONAL.....	6
1.1.    ENERGÍA HIDRÁULICA.....	6
1.2.    GENERACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA.....	6
1.2.1.    Tipos de centrales hidroeléctrica.....	6
1.2.2.    Componentes de una unidad generadora.....	7
1.2.3.    Tipos de turbina hidroeléctrica.....	8
a)    Turbina Francis.....	8
b)    Turbina Pelton.....	8
c)    Turbina Kaplan.....	8
1.3.    IMPACTO AMBIENTAL.....	9
1.4.    LA EMPRESA.....	9
1.4.1.    Propósito.....	10
1.4.2.    Valores.....	10
1.4.3.    Estrategia de gestión de activos.....	10
1.4.4.    Activos.....	11
1.5.    COMPLEJO HIDROELÉCTRICO ACONCAGUA.....	12
1.5.1.    Central Hornitos.....	13
1.5.2.    Diagrama EPS Central Hornitos (entrada, proceso y salida) y Diagrama de bloques de proceso de generación energía eléctrica.....	15
1.5.3.    Ubicación de los activos dentro de la central.....	16
1.6.    DIAGNOSTICO DE LA UNIDAD HORNITOS.....	16
1.6.1.    Análisis de criticidad.....	17
1.6.2.    Problemática.....	19
1.6.3.    Cantidad de fallas.....	20

1.6.4.	Disponibilidades y confiabilidades.....	20
1.6.5.	Taxonomía.....	21
1.6.6.	Modos de falla.....	22
1.6.7.	Plan de mantenimiento actual.....	24
CAPITULO 2. PROPUESTA DE MEJORA.....		27
2.	PROPUESTA DE MEJORA.....	29
2.1.	ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LA UNIDAD GENERADORA.....	29
2.1.1.	Identificación de potenciales causas de fallas.....	29
2.2.	PLAN DE ACCIÓN.....	32
CAPITULO 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....		39
3.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	41
3.1.	DETERMINACIÓN DE COSTOS.....	41
3.1.1.	Costos fijos.....	43
3.1.2.	Costos por no producción.....	44
3.1.3.	Costos por Mano de obra (Horas Hombre).....	44
3.2.	COSTOS POR FALLAS.....	46
3.3.	COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA.....	47
3.4.	EVALUACIÓN DE COSTOS ACTUALES VS PROPUESTA.....	49
CONCLUSIÓN.....		51
BIBLIOGRAFÍA.....		53
ANEXO.....		55
A.	TIPOS DE TURBINAS UTILIZADAS EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO.....	55
1.	Turbina Francis.....	55
2.	Turbina Pelton.....	55
3.	Turbina Kaplan.....	55
B.	VALORES.....	56
C.	DIVISIÓN DE ACTIVOS DE COLBÚN S.A.....	57
D.	CONFIGURACIÓN COMPLEJO ACONCAGUA.....	58
E.	PLANOS SISTEMA OLEO-HIDRÁULICO UNIDAD HORNITOS.....	59
F.	HORAS DE SERVICIO, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNIDAD HORNITOS.....	62

G. CRITICIDAD DE LOS SISTEMAS.....	64
H. TABLA DE FALLAS.....	67
I. ÁRBOL DE DECISIONES. ....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Esquema de una Central hidroeléctrica de pasada.....	7
Ilustración 2. Gobernador o Unidad Oleo-Hidráulica (imagen propia).....	8
Ilustración 3. Partes y sentido de flujo de las turbinas hidráulicas Kaplan, Pelton y Francis.....	9
Ilustración 4. Distribución de las centrales pertenecientes al Complejo Hidroeléctrico Aconcagua (Fuente: colbun.cl). .....	13
Ilustración 5. Diagrama descriptivo de instalaciones hidráulicas Complejo Hidroeléctrico Aconcagua (diagrama desde (2015). Manual de Operaciones Central Hornitos). .....	13
Ilustración 6. Toma aérea Central Hidroeléctrica Hornitos (Fuente: (2015). Manual de Operaciones Central Hornitos). .....	14
Ilustración 7. Planta 1. ....	16
Ilustración 8. Planta 2. ....	16
Ilustración 9. Planta 3 .....	16
Ilustración 10. Planta 4. ....	16
Ilustración 11. Representación en corte de la válvula.....	26
Ilustración 12. Desarenador 1 y 2 en bocatoma Hornitos.....	36
Ilustración 13. Propuesta de mejora de filtrado de aceite en circuito de recirculación .....	38
Ilustración 14. Turbinas hidráulicas más comunes (altura “H” vs caudal “Q”).....	55
Ilustración 15. Simbología planos. Creados por VATECH. ....	59
Ilustración 16. Plano circuito principal del gobernador. Creados por VATECH. ....	59
Ilustración 17. Plano de circuito de recirculación de aceite. Creado por VATECH.....	60
Ilustración 18. Plano sistema de nitrógeno. Creado por VATECH. ....	60
Ilustración 19. Parte 1 Plano sistema Control de válvula principal y by-pass. Creado por VATECH. ....	61
Ilustración 20. Parte 2 Plano sistema Control de válvula principal y by-pass. Creado por VATECH .....	61
Ilustración 21. Árbol de decisiones (Fuente: Reability Centered Maintenance RCM II, Jhon Moubray).....	68
Ilustración 22. Lógica de la selección de estrategias de Mantenimiento: enfoque RCM. Fuente: (Carlos Alberto Parra Márquez, 2015).....	68

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Planos de la central (fabricación propia).....	16
Tabla 2. Matriz de criticidad (Carlos Alberto Parra Márquez, 2015) .....	17
Tabla 3. Ejemplo para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de los sistemas (creación propia).....	18
Tabla 4. Criticidad de los sistemas (creación propia). .....	18
Tabla 5. Resumen cantidad de fallas en sistema oleo-hidráulico de Central Hornitos (creación propia).....	20
Tabla 6. Resumen Disponibilidad y Confiabilidad unidad Hornitos (creación propia).....	21
Tabla 7. FMECA Planta de Aceite. P1.....	22
Tabla 8. FMECA Planta de aceite. P2.....	22
Tabla 9. FMECA Sistema de Nitrógeno. P1. ....	23
Tabla 10. FMECA Sistema de Nitrógeno. P2. ....	23
Tabla 11. FMECA Control de turbina. P1.....	23
Tabla 12. FMECA Control de turbina. P2.....	24
Tabla 13. FMECA Control válvula principal y by-pass. P1. ....	24
Tabla 14. FMECA Control válvula principal y by-pass. P2. ....	24
Tabla 15. 5 POR QUÉ Contaminación de aceite (creación propia).....	30
Tabla 16. 5 POR QUÉ Saturación de filtros (creación propia).....	31
Tabla 17. 5 POR QUÉ Falla en componentes hidráulicos (creación propia).....	32
Tabla 18. Plan de acción "Contaminación de aceite". (Creación propia) .....	33
Tabla 19. Plan de acción "Saturación de filtros" (creación propia). ....	33
Tabla 20. Plan de acción "Fallas en componentes oleo-hidráulico" (creación propia).....	34
Tabla 21. Propuesta de Plan de Acción General .....	35
Tabla 22. Costos de Inversión ([kUS\$/MW]) - Estudio de Determinación de Costos por Tecnología de Generación. ....	41
Tabla 23. Costos de inversión referencial unitario ([US\$/kW]) - Fuente: CNE.....	42
Tabla 24. Costos fijos por tecnología (% valor de inversión) - Fuente: CNE. ....	43
Tabla 25. Costos por Horas Hombre (HH) de las fallas anual. Creación Propia.....	45
Tabla 26. Costos por Hora Hombre de la propuesta de mejora pt1. Creación propia.....	45
Tabla 27. Costos por Hora Hombre de la propuesta de mejora pt2. Creación propia.....	46
Tabla 28. Costos por falla anual. (Creación propia). ....	47
Tabla 29. Costos de la propuesta de mejora T1. (Creación propia).....	48
Tabla 30. Costos de la propuesta de mejora T2. (Creación propia).....	48
Tabla 31. Costos esperados con la propuesta.....	49
Tabla 32. Comparación escenario actual vs escenario futuro. (creación propia).....	50
Tabla 33. Horas de servicio Central Hornitos 2020.....	62
Tabla 34. Horas de servicio Central Hornitos 2021.....	62
Tabla 35. Horas de servicio Central Hornitos 2022.....	63

Tabla 36. Horas de servicio Central Hornitos 2023.....	63
Tabla 37. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Generación. .....	64
Tabla 38. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Distribución de aguas.....	64
Tabla 39. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Refrigeración.....	65
Tabla 40. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Control.	65
Tabla 41. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema Neumático.	66
Tabla 42. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Lubricación. .....	66
Tabla 43. Resumen de fallas (creación propia). .....	67

ÍNDICE DE DIAGRAMAS.

Diagrama 1. Grupo de activos "Centrales Hidroeléctricas" (Creación propia). .....	12
Diagrama 2. Diagrama EPS, Entrada, Proceso, Salida (Creación propia).....	15
Diagrama 3. Flujograma del proceso de generación (Creación propia). .....	15
Diagrama 4. Flujograma secuencial de las metodologías a utilizar. (Creación propia).....	16
Diagrama 5. Taxonomía según norma ISO 14224. (Creación Propia). .....	21
Diagrama 6. Desgaste de componentes (Creación propia). .....	30
Diagrama 7. Saturación de filtros (Creación propia). .....	30
Diagrama 8. División de activos Colbún S.A (Creación propia). .....	57
Diagrama 9. Capacidad de filtración de cada filtro según tamaño. (Creado por HYDAC). .....	61

## SIGLAS, SIMBOLOGÍA Y GLOSARIO.

### SIGLAS.

- bar: Unidad de presión bar.
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono.
- CA: Corriente Alterna.
- CC: Corriente Continua.
- CEN: Coordinador Eléctrico Nacional.
- CNE: Comisión Nacional de Energía.
- COMA: Costos Operación, Mantenimiento y Administración.
- DGA: Dirección General de Aguas.
- kUS\$: Kilo dólar americano
- kUS\$/MW: Kilo dólar americano sobre Mega Watt
- kV: kilo Volt.
- kW: kilo Watt.
- hrs: Horas
- m: Metros.
- m<sup>3</sup>: Metros Cúbicos.
- m<sup>3</sup>/s: Metros cúbicos sobre segundos.
- min: Minutos.
- MM: Mantenimiento Mayor.
- MPB: Mantenimiento Preventivo Básico.
- MW: Mega Watt.
- PMGD: Pequeño medio de generación distribuido.
- SEN: Sistema Eléctrico Nacional.
- μm: Micrómetro.
- US\$: dólar americano.
- US\$/kW: dólar americano sobre kilo Watt

### GLOSARIO.

- Almacenamiento BESS (por sus siglas en inglés, Battery Energy Storage System) es una tecnología que almacena energía en baterías para liberarla cuando sea necesario. Los BESS son una solución para garantizar un suministro de energía constante y fiable, especialmente en momentos de alta demanda o cuando el clima no es ideal para la generación de energía renovable.
- Caudal: Cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal) por unidad de tiempo.
- Flujo centrípeto: Según la RAE, es un flujo dirigido radialmente hacia el centro, que se manifiesta en cuerpos que describen trayectorias curvas.
- Generador síncrono: Un generador síncrono es una máquina rotativa que convierten la energía mecánica en energía eléctrica, se compone de un estator (parte fija) y un rotor. El rotor de un generador síncronos se compone de un imán permanente, a diferencia de un generador asíncrono, que posee un rotor de jaula de ardilla o bobinado.
- SAP PM: o SAP Plant Maintenance, es un software que ayuda a las empresas industriales a gestionar el mantenimiento de sus sistemas técnicos.

## **INTRODUCCIÓN.**

La energía eléctrica puede ser producida por diferentes centrales de generación, que pueden tener en su origen alguna fuente renovable como no renovable. Dentro de las fuentes renovables se puede indicar como ejemplo, la fuente de energía solar fotovoltaica, solar térmica, Eólica, mareomotriz, biomasa, geotérmica e hidráulica.

El origen de la energía hidráulica tal y como se conoce en la actualidad tuvo lugar a comienzos de la Revolución Industrial. La primera central hidroeléctrica moderna se construyó en 1880 en Gran Bretaña. Sin embargo, se debe señalar que civilizaciones antiguas, como Romana o China, utilizaban en su cultura los molinos de agua para aprovechar la fuerza.

La sequía producida por el cambio climático está presente en el país y considerando los avances tecnológicos presentados en la última década en materia de generación eléctrica, se evidencia el aumento de otras fuentes de generación eléctrica que han provocado el cambio y la diversificación en la matriz de producción de energía eléctrica en el país; siendo la falta del recurso hídrico la gran causal que ha provocado una baja considerable en el desarrollo de proyectos de gran escala o envergadura hidroeléctrica y a su vez se evidencia el avance en nuevos proyectos de otras fuentes de energía de origen renovable. El aumento de la generación de energía en base a fuentes renovable ha sido importante en los últimos años, llegando a un 62% de generación de energía total en el 2024. Hoy en Chile la energía hidráulica representa un 22,3% de la capacidad instalada de energía en el país.

Las fuentes de energías hidráulicas dan paso a lo denominado como Centrales Hidráulicas de generación de energía eléctrica. Siendo las centrales un conjunto de construcciones de orden civil - mecánicas a su vez se involucra una gran cantidad de equipos técnicos eléctricos electrónicos que deben ser instalados y programados para efectuar una operación confiable y estable. La operación de las centrales, en gran parte de los casos, es constante debido a la disponibilidad del recurso hídrico que alimenta a estas centrales y/o a la necesidad eléctrica que requiera el sistema o los clientes, por lo que, es normal encontrar unidades generadoras con disponibilidades y confiabilidades por sobre 90%, significando que la operación y mantenimiento deben contar con planificaciones adecuadas a las épocas esperadas de mayor demanda energética y mayor producción debido al aumento de los caudales de los afluentes que las alimentan.

En Chile, las centrales de generación eléctrica están regidas por un organismo denominado CEN, que es el Coordinador Eléctrico Nacional. Este ente es una corporación autónoma de derecho público, sin fines de lucro, con patrimonio propio y de duración indefinida. El Coordinador no forma parte de la Administración del Estado. Técnica o eléctricamente está compuesto por los antiguos sistemas, el Interconectado Central (SIC) e Interconectado del Norte Grande (SING), además coordina al SEA, Sistema Eléctrico de Aysén y SEM, Sistema eléctrico de Magallanes.

**OBJETIVO GENERAL.**

Proponer un plan de mejora operacional para la Central Hidroeléctrica Hornitos perteneciente a Colbún complejo Hidroeléctrico Aconcagua.

**OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Diagnosticar el estado actual de la central Hornitos para el establecimiento de la base del estudio mediante el uso de diversas metodologías.
- Analizar las posibles fallas resultantes del diagnóstico para la creación de mejoras que sean de base para las demás centrales con turbina tipo Pelton pertenecientes al complejo y a la compañía.
- Evaluar la relación costo-beneficio de la implementación de la propuesta de mejora así lograr la determinación de su factibilidad.

**CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES GENERALES.**



## **1. CONTEXTO OPERACIONAL**

El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer un plan de mejora operacional para la Central Hidroeléctrica Hornitos perteneciente a Colbún complejo Hidroeléctrico Aconcagua, por medio de un análisis de las fallas tomando como base los últimos 4 años con la finalidad de determinar una mejora en términos operacionales, de mantenimiento y económicos para la compañía.

### **1.1. ENERGÍA HIDRÁULICA.**

La energía hidráulica es un tipo de energía de origen renovable, es decir, es un tipo de energía derivada de fuentes de origen natural que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse. La energía hidráulica es definida como un tipo de energía que aprovecha el movimiento del agua, también llamada energía hídrica; permite obtener la electricidad gracias al aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las corrientes o saltos de agua.

Hoy en día, el uso más frecuente de la energía hidráulica es para producir electricidad. A enero del 2024, en Chile un 23,5% del total de energía eléctrica generada es por medio de centrales hidroeléctricas situadas a lo largo y ancho del territorio nacional.

### **1.2. GENERACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA.**

Las centrales hidroeléctricas generalmente se ubican en regiones donde existe una combinación adecuada de lluvias y desniveles geológicos favorables a la construcción de represas y con grandes alturas de caída por desnivel.

La energía hidráulica se obtiene a partir de la transformación de energía potencial a cinética de las masas de agua que transportan los ríos, provenientes de la lluvia y del deshielo, guiando estas masas de agua de manera controlada a través de canales, túneles y tuberías forzadas hacia una o unas turbinas conectadas a un generador por medio de un eje vertical u horizontal dependiendo la configuración de la unidad generadora.

#### **1.2.1. Tipos de centrales hidroeléctrica.**

Las centrales hidroeléctricas se clasifican de acuerdo con la legislación vigente y a través de la Ley 20.257, que introdujo modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales, se estableció para la energía hidráulica el límite de potencia máxima inferior a 20 [MW], denominándolas pequeñas centrales hidroeléctricas

Mediante *Resolución Exenta N° 17951, del 23 de marzo de 2017*, de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, que “*regula el diseño y ejecución de las instalaciones de centrales hidroeléctricas conectadas a la red de distribución*”, señala que los sistemas hidroeléctricos de potencias menores o iguales a 100 [kW], se clasifican según la siguiente forma:

- Micro-hidro: Cuyas potencias se encuentren entre 5 [kW] y 100 [kW].
- Pico-hidro: Generadoras de potencias menores a 5 [kW].

### 1.2.2. Componentes de una unidad generadora.

Una unidad Generadora de electricidad necesita componentes específicos para poder ser operada de una manera confiable, correcta y amigable con el medio ambiente. Dentro de los componentes existen tres grandes grupos de equipamiento, obras hidráulicas, instalaciones y componentes eléctricos, y componentes mecánicos.

Las obras hidráulicas son las encargadas de captar, regular y guiar la cantidad de agua necesaria para la generación. Los componentes mecánicos cumplen la misión de poder hacer un enlace entre la energía cinética del agua y el generador. Los componentes e instalaciones eléctricas son los encargados de controlar la generación de electricidad y transportarla desde la central hacia las líneas de transmisión eléctrica (Ilustración 1).

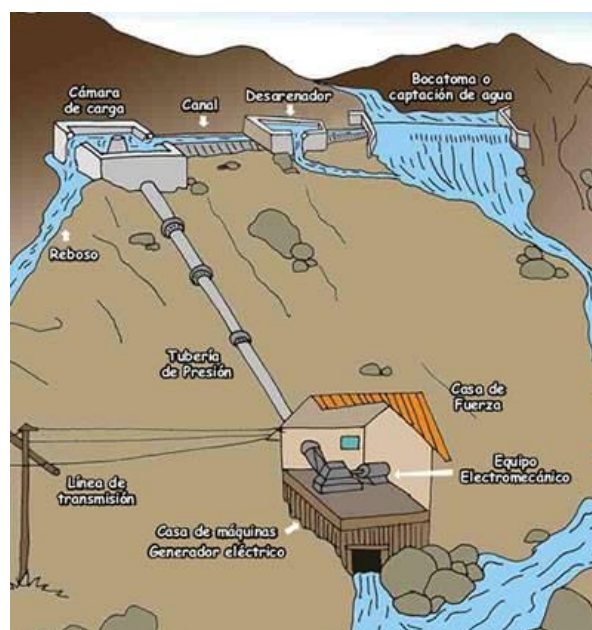


Ilustración 1. Esquema de una Central hidroeléctrica de pasada

Dentro de los componentes mecánicos se encuentra el sistema Oleo-hidráulico, el cual es un conjunto de equipos encargados de generar una presión de trabajo suficiente para que el sistema de control (perteneciente a los componentes eléctricos y electrónicos) pueda accionar y regular los componentes mecánicos de acción hidráulica de la unidad, tales como:

- Los inyectores, quienes permiten la impulsión de agua hacia una turbina.
- Los deflectores, que es un mecanismo de seguridad de la turbina que está en alerta ante la necesidad de una salida de servicio de la unidad generadora.
- La válvula principal, la cual permite el corte y paso del agua en su magnitud.
- La válvula BY-PASS de llenado, la cual permite equiparar presiones de trabajo para una puesta en servicio segura de la unidad generadora.

Además, el sistema cuenta con bombas de impulsión, sistema auxiliar de refrigeración, sistema de control, electroválvulas, servo válvulas encargadas de distribuir la presión de aceite en los equipos requeridos por la automatización para una operación segura y confiable, junto con sensores de temperatura, sensores de presión, sensores de posición de los equipos, un estanque de aceite o gobernador (Ilustración 2), entre otros.



*Ilustración 2. Gobernador o Unidad Oleo-Hidráulica (imagen propia).*

### 1.2.3. Tipos de turbina hidroeléctrica.

Para la generación eléctrica, se utilizan normalmente 3 tipos de turbinas (Ilustración 3), dependiendo del caudal de agua y de la diferencia de altura son la turbina Francis, la turbina Pelton y la turbina Kaplan (*la definición se encuentra en anexo TIPOS DE TURBINAS UTILIZADAS EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO.*).

- a) Turbina Francis.
- b) Turbina Pelton.
- c) Turbina Kaplan.

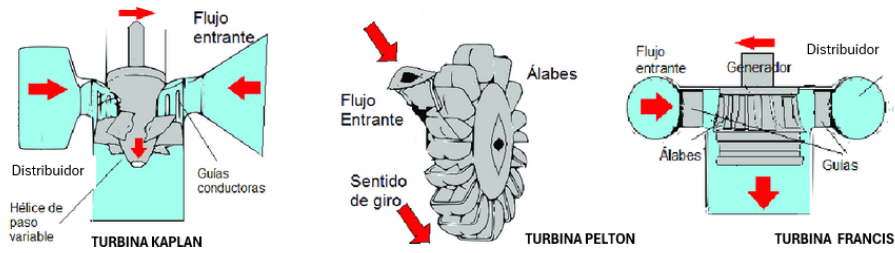


Ilustración 3. Partes y sentido de flujo de las turbinas hidráulicas Kaplan, Pelton y Francis.

### 1.3. IMPACTO AMBIENTAL.

Se ha considerado que la electricidad de origen hidráulico es una alternativa energética limpia. Existen efectos ambientales debido a la construcción de las centrales hidroeléctricas y sus infraestructuras.

La construcción de represas, obras para el almacenaje y transporte del agua provoca un impacto ambiental que se extiende desde la captación del agua hasta donde es devuelta a su cauce, este impacto muchas veces genera impactos irreversibles:

- Sumerge tierras las obras de almacenaje de agua, alterando el territorio.
- Modifica el ciclo de vida de la fauna.
- Dificulta la navegación fluvial y el transporte de materiales aguas abajo (nutrientes y sedimentos como limos y arcillas).
- Disminuye el caudal de río, modificando el nivel de las capas freáticas, la composición de las aguas embalsadas y el microclima.

Los costes ambientales y sociales pueden ser evitados o reducidos a un nivel aceptable si se evalúan cuidadosamente y se implantan medidas correctivas. Cuando se construye una presa se analiza muy bien los posibles impactos ambientales frente a la necesidad de crear nuevos embalses.

### 1.4. LA EMPRESA

La empresa Colbún S.A. es una empresa de origen chileno, dedicada a la generación y comercialización de energía eléctrica y a la provisión de soluciones energéticas. Cuentan con 27 centrales en Chile y Perú, más de 1.000 trabajadores y una capacidad instalada cercana a los 4.000 [MW].

La empresa posee una hoja de ruta para duplicar su tamaño al 2030 en base a energías renovables, ofreciendo además soluciones energéticas que ayudan a las metas de sostenibilidad de

nuestros clientes. Buscan oportunidades para crecer en Hidrógeno Verde y tratamiento de aguas.  
(extracto desde la página web [Nosotros - Propósitos \(colbun.cl\)](http://colbun.cl))

#### 1.4.1. Propósito.

Transformamos la energía, en equilibrio con el planeta, para impulsar tus proyectos y sueños.

#### 1.4.2. Valores.

Colbún S.A. cuenta con 6 valores principales (*definidos en anexo*)

VALORES.)

1. **LIDERAMOS RESPONSABLEMENTE.**
2. **NOS IMPORTAN LAS PERSONAS.**
3. **TENEMOS UN PROPÓSITO INTEGRADOR.**
4. **QUEREMOS DEJAR UNA HUELLA POSITIVA.**
5. **ACTUAMOS CON COHERENCIA.**
6. **TRABAJAMOS CON PASIÓN.**

#### 1.4.3. Estrategia de gestión de activos.

La estrategia de gestión de activos de la compañía está basada en la norma ISO 55000:2014 “Gestión de activos — Aspectos generales, principios y terminología” (ISO, 2014), la cual se resume en:

La gestión de nuestros activos es fundamental para lograr las condiciones de seguridad, continuidad y calidad del suministro eléctrico que ofrecemos a nuestros clientes. **Nuestro compromiso con la generación de valor y la excelencia operacional se sustenta en una planificación estratégica y una apropiada gestión de los riesgos que pueden afectar la infraestructura de la Compañía.**

Para realizar estas evaluaciones contemplamos el ciclo de vida completo de los activos y consideramos el equilibrio económico, social y ambiental junto con parámetros de costo, beneficio, riesgo y desempeño. Estos enfoques de planificación de escenarios o análisis de alternativas incluyen evaluación de sitios, tecnologías, así como implicancias sociales, ambientales, regulatorias y económicas.

De manera específica, aplicamos estudios acerca de:

- Prácticas de mantenimiento a corto y largo plazo.
- Gestión de máximos de carga, como acuerdos de suministros interrumpible planificados para garantizar el suministro de electricidad.
- Inversión o desinversión en generación, transmisión y distribución y gestión de la demanda.

Algunos factores externos que podrían influir en la asequibilidad de la energía para nuestros clientes son la zona geográfica en que se encuentran las condiciones climáticas, las políticas y los programas de utilidad pública.

<b>DESAFÍO IDENTIFICADO</b>	<b>ENFOQUE DE GESTIÓN</b>
<b>MANTENIMIENTOS</b>	Establecemos estrategias que incluyen mantenimientos correctivos de nuestros activos, basados en condición y predictivos, entre otros. Adicionalmente, se consideran otros

	aspectos en la toma de decisiones como por ejemplo costo/beneficio, riesgos, relaciones con las comunidades y seguridad del sistema
<b>FLEXIBILIDAD</b>	Debido al proceso de transición energética, las centrales térmicas -en particular las de gas natural- se convierten en actores relevantes en el sistema, principalmente en respaldo de energía, seguridad y estabilidad, producto de la introducción de energía de fuentes variables
<b>INVERSIONES</b>	Contamos con una política de Gestión De Activos y Desempeño Energético que da los principios generales para la toma de decisiones de inversión. Adicionalmente, Existen diferentes instancias de aprobaciones definidas para las diferentes decisiones de inversión.
<b>CONTROL Y GESTIÓN DE RIESGOS</b>	La política de Control y Gestión de Riesgos entrega los principios para toda la Compañía con el fin de resguardar la sustentabilidad del negocio.

Reconociendo la importancia de la gestión energética para nuestros clientes, promovemos la mejora continua en nuestras actividades y cumplimos proactivamente con la legislación vigente.

#### 1.4.4. Activos.

Hasta la fecha, la empresa divide a sus activos en cuatro grandes grupos: Centrales Hidroeléctricas, Centrales Térmicas, Parques solares y proyectos (*Ver anexo Diagrama 8. División de activos Colbún S.A (Creación propia).*). En *Diagrama 1* se presenta los activos “Centrales hidroeléctricas de la empresa, en donde el activo en estudio se encuentra principalmente en la Cuenca del Aconcagua o también denominado Complejo Hidroeléctrico Aconcagua.

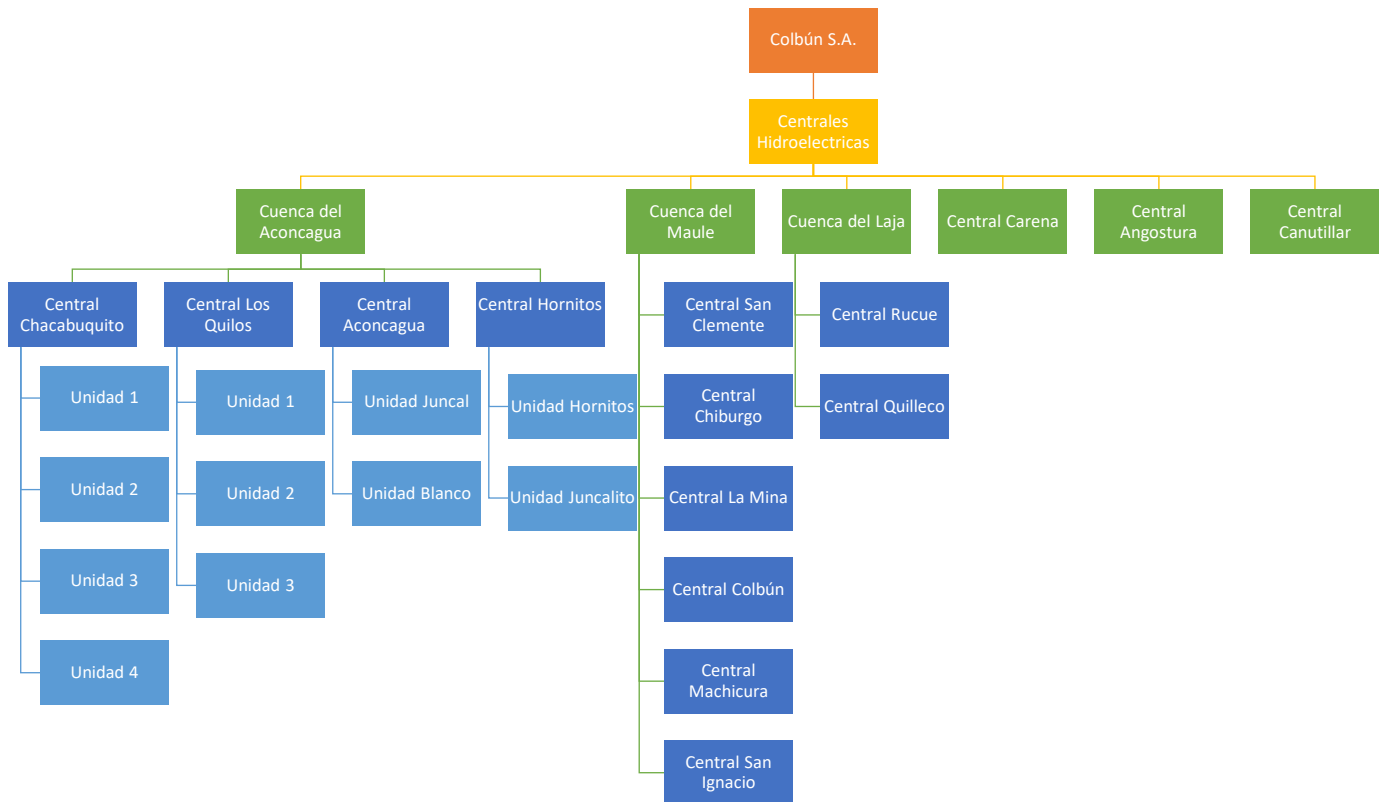


Diagrama 1. Grupo de activos "Centrales Hidroeléctricas" (Creación propia).

### 1.5. COMPLEJO HIDROELÉCTRICO ACONCAGUA.

El Complejo Hidroeléctrico Aconcagua pertenece a la empresa Colbún S.A, este complejo está compuesto por un grupo de centrales generadoras de electricidad posicionadas estratégicamente por la cuenca del río Aconcagua (ver *Ilustración 4*). Cada unidad generadora es del tipo centrales de pasada que captan los caudales de los ríos Juncalillo, Juncal, Blanco, Colorado y Aconcagua para generar electricidad. Cada central posee un caudal de agua autorizado para su turbinado, esta acción provoca una fuerza motriz que por medio de un generador síncrono generan electricidad.

Los caudales de los afluentes son desviados por obras hidráulicas que derivan las aguas hacia canales de aducción y embalses de regulación; las aguas fluyen hacia las cámaras de carga, sector donde el agua es guiada por una tubería de presión hacia cada central generadora para producir electricidad y posteriormente según su configuración vuelve al río o continua su flujo hacia otra central generadora (ver *Ilustración 5*).

Las centrales generadoras del complejo poseen 11 unidades generadoras de distinta composición técnica mecánica, que por sus capacidades de generación y alturas de caídas poseen turbinas tipo Pelton, Francis, Kaplan, (la distribución y configuración de estas centrales se encuentra en Anexo CONFIGURACIÓN COMPLEJO ACONCAGUA.). Estas unidades de generación poseen nombres propios y con una potencia instalada de:

- Unidad Hornitos 55 [MW].

- Unidad Juncalito 1,5 [MW].
- Unidad Juncal 29,2 [MW].
- Unidad Blanco 56 [MW].
- Unidad N°1, N°2 y N°3 de Los Quilos de 13,5 [MW] cada unidad.
- Unidad N°1, N°2, N°3 y N°4 de Chacabuquito de 7,5 [MW] cada unidad.



Ilustración 4. Distribución de las centrales pertenecientes al Complejo Hidroeléctrico Aconcagua (Fuente: colbun.cl).

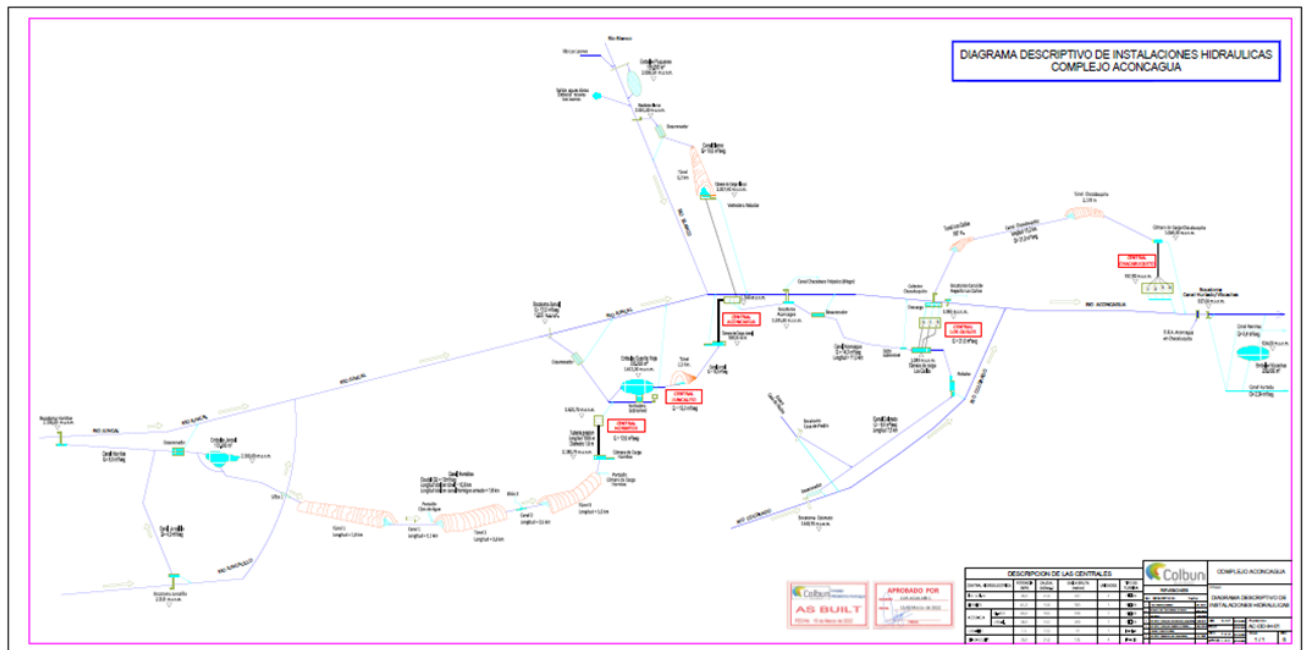


Ilustración 5. Diagrama descriptivo de instalaciones hidráulicas Complejo Hidroeléctrico Aconcagua (diagrama desde (2015). Manual de Operaciones Central Hornitos).

### 1.5.1. Central Hornitos.

El activo en estudio será la Unidad Generadora Hornitos, ubicada en el sector Guardia Vieja, camino internacional, hacia el este de la provincia de Los Andes, región de Valparaíso. Longitud 70°15'54,98" Oeste, Latitud 32°54'7,92" Sur (*ver Ilustración 6*).

El diseño de la Central Hornitos aprovecha los caudales del río Juncalillo y río Juncal contemplando un caudal permitido por la DGA de 12,1 [m<sup>3</sup>/s] en total, además posee una caída neta de 555 [m] desde cámara de carga hasta la turbina para entregar una potencia máxima de 55 [MW] en el nivel de tensión de 11/ 220 [kV]. La Central Hornitos se conecta a través de la Línea 1 X 220[kV] Hornitos – Los Maquis.

De la Central Hornitos tenemos conectada desde la barra a la central Juncalito lo que se conecta al transformador de 11/220 [kV].

La Central Hornitos posee 1 Unidad Generadora Fabricada por Vatech y varias instalaciones aledañas que están compuestas por:

- Bocatoma Juncalillo.
- Bocatoma Juncal.
- Embalse Hornitos.
- Cámara de Carga Hornitos.
- Tubería de Presión.
- Sala de Máquinas.
- Subestación Hornitos.

Además, la Unidad Hornitos esta compuesta por los siguientes sistemas principales:

- Sistema Generador de energía eléctrica.
- Sistema de distribución de aguas.
- Sistemas de refrigeración.
- Sistema oleo-hidráulico.
- Sistemas auxiliares.
  - Sistema de control.
  - Sistema neumático.
  - Sistema de lubricación.
  - Sistema de servicios auxiliares de CC y CA.



*Ilustración 6. Toma aérea Central Hidroeléctrica Hornitos (Fuente: (2015). Manual de Operaciones Central Hornitos).*

1.5.2. Diagrama EPS Central Hornitos (entrada, proceso y salida) y Diagrama de bloques de proceso de generación energía eléctrica.

Para entender el proceso de generación, se crea un diagrama EPS (*ver Diagrama 2*) y un flujograma de bloques (*ver Diagrama 3*). Estos aportan una mejor forma de entender el proceso de generación eléctrica en una central hidroeléctrica de pasada, en este caso, la Central Hornitos. Indicando en ellas las captaciones de las aguas, los subprocesos involucrados en la generación y hacia donde se entrega la electricidad generada.

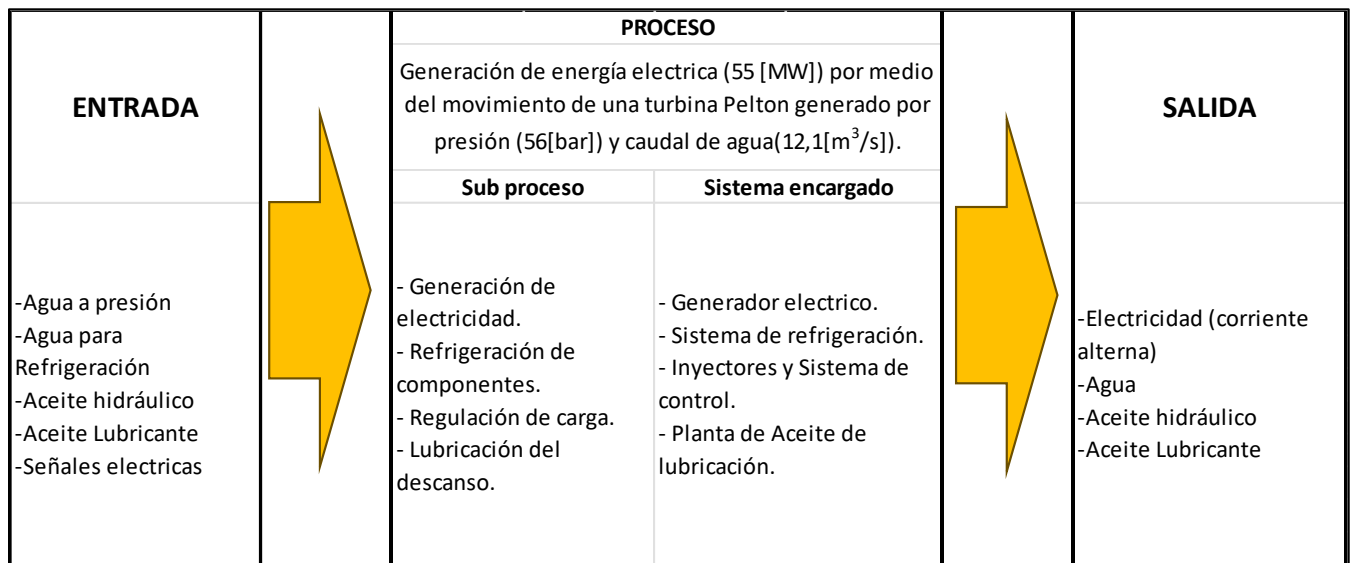


Diagrama 2. Diagrama EPS, Entrada, Proceso, Salida (Creación propia)

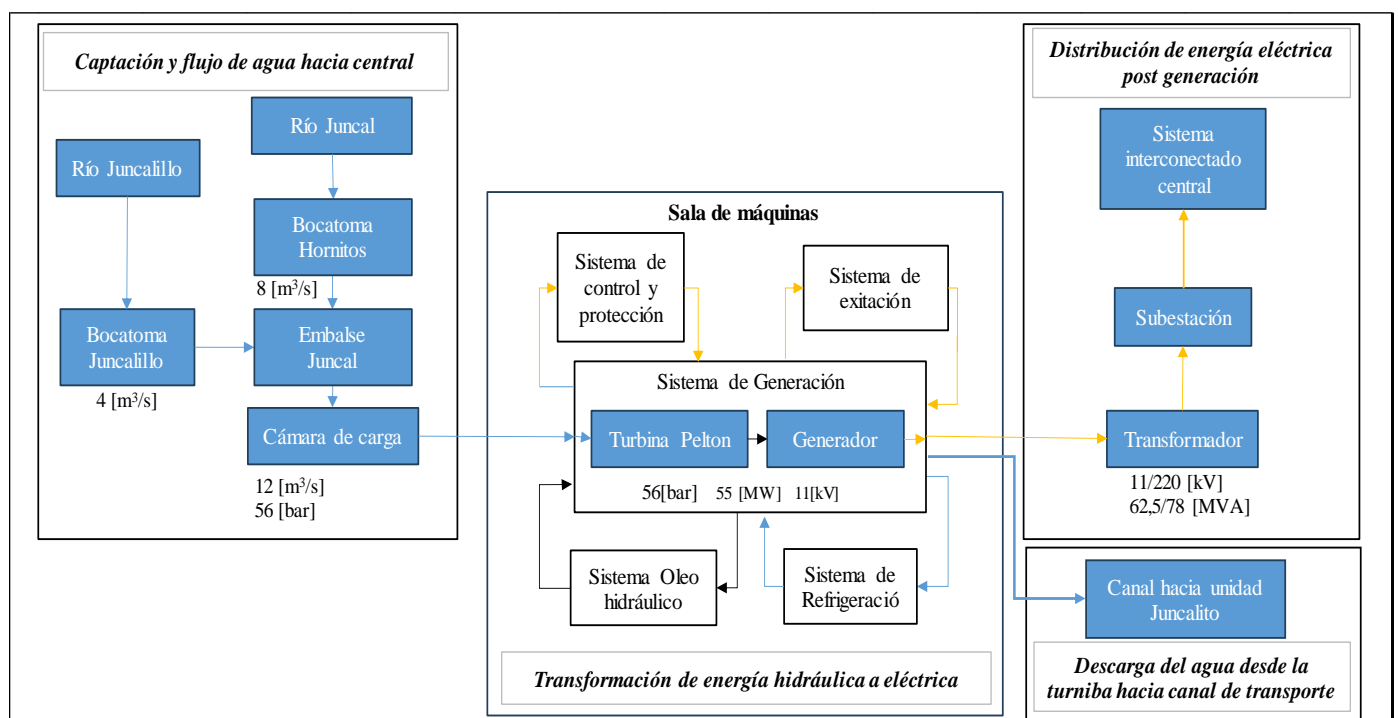
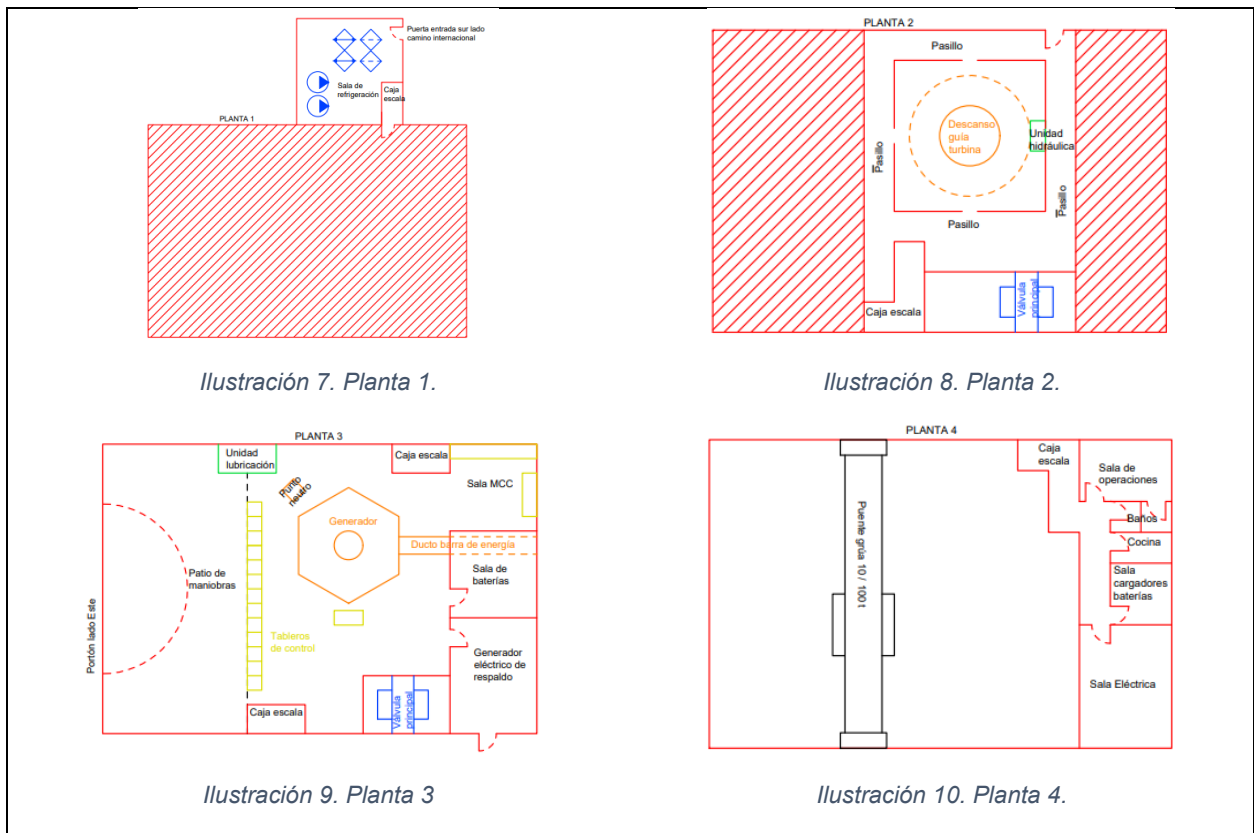


Diagrama 3. Flujograma del proceso de generación (Creación propia).

1.5.3. Ubicación de los activos dentro de la central.

Las ubicaciones se encuentran divididas en 4 Plantas referenciando a los niveles o pisos que componen a la central Hornitos y en su interior cuenta con los distintos activos y salas que lo componen (ver Tabla 1).

Tabla 1. Planos de la central (fabricación propia).



1.6. DIAGNOSTICO DE LA UNIDAD HORNITOS.

Para crear una propuesta de mejora se requiere de la aplicación de diversas metodologías para el diagnóstico y análisis de la situación actual de la unidad. Las metodologías utilizadas son presentadas a continuación en orden cronológico en Diagrama 4:

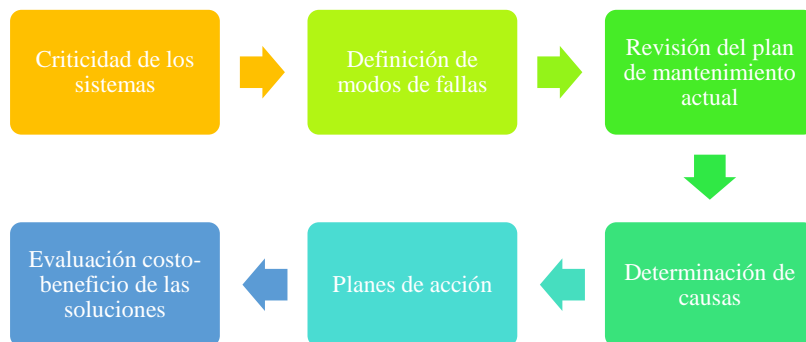


Diagrama 4. Flujograma secuencial de las metodologías a utilizar. (Creación propia)

### 1.6.1. Análisis de criticidad.

Para realizar el diagnóstico de la central Hornitos se escoge y utiliza la metodología semi cualitativa de matrices de criticidad de 4\*5 propuestas en (Carlos Alberto Parra Márquez, 2015) (ver *Tabla 2*) debido a que es una metodología que considera diversos factores que afectan a un activo, sobre todo en la industria de energías renovables, en donde factores como impacto operacional o impacto en seguridad, higiene y ambiente pueden verse alterados según el activo en estudio debido a la alta disponibilidad que cuentan las centrales generadoras, así como el contacto cercano con energía proveniente del medio ambiente puede causar daños a este.

Para el cálculo de criticidad de cada sistema principal que compone a la central Hornitos se utiliza las ecuaciones:

$$C = (OI \times OF) + MC + SEI$$

$$Criticidad = C * FF$$

Donde:

- C = Consecuencia.
- FF = Frecuencia de Falla.
- OI = Impacto Operacional.
- OF = Flexibilidad Operacional.
- MC = Costos de Mantenimiento.
- SEI = Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene.

*Tabla 2. Matriz de criticidad (Carlos Alberto Parra Márquez, 2015)*

FRECUENCIA	4	MC	MC	AC	AC	AC
	3	MC	MC	MC	AC	AC
	2	BJ	BJ	MC	AC	AC
	1	BJ	BJ	BJ	MC	AC
			10	20	30	40
		CONSECUENCIA				

Para obtener estos datos se requirió del testimonio de personal de operaciones, exclusivamente de operadores familiarizados con la Central Hornitos. Para ello se realizó una evaluación por medio de la siguiente tabla (*Tabla 3*) para los sistemas principales (*en anexo*

CRITICIDAD DE LOS SISTEMAS. *se encuentran las demás evaluaciones):*

Tabla 3. Ejemplo para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de los sistemas (creación propia).

SISTEMA OLEO-HIDRÁULICO			Análisis de criticidad	
Frecuencia de Falla (FF)	Fallas por año	Ponderación	Equipo para evaluar:	Puntuación
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	4
Promedio	Entre 5 y 7	3	Impacto Operacional	8
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	4
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	8
			<b>Total</b>	<b>42</b>
Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la generación	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencias	Ponderación		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o similar	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
Costo de Mantenimiento (CM)	Consecuencias	Ponderación		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo daños reversibles	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños severos	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e incidentes	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Al realizar este análisis para cada sistema, se obtiene la criticidad de cada uno (Tabla 4):

Tabla 4. Criticidad de los sistemas (creación propia).

ANÁLISIS DE CRITICIDAD				
Sistemas	Consecuencia	Frecuencias de fallas	Riesgo	Criticidad
SISTEMA OLEO-HIDRÁULICO	42	4	168	Alta Criticidad
SISTEMA DE GENERACIÓN	43	2	86	Alta Criticidad

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	25	3	75	Media Criticidad
SISTEMA DE CONTROL	23	3	69	Media Criticidad
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS	19	3	57	Media Criticidad
SISTEMA DE LUBRICACIÓN	48	1	48	Alta Criticidad
SISTEMA NEUMATICO	4	1	4	Baja Criticidad

El riesgo/criticidad para este tipo de industria está estrechamente relacionado a la incapacidad de la máquina de generar electricidad. Si bien todos los sistemas son críticos y presentan altos riesgos en la generación, se obtiene un alto valor en el sistema oleo-hidráulico debido a ser un sistema que trabaja en conjunto con todos los demás, volviéndose uno de los más importantes para la generación y su alta frecuencia de fallas durante los últimos 4 años.

Colbún Complejo Hidroeléctrico Aconcagua desde inicios de 2024 ha tomado medidas de mejoramiento para los sistemas de refrigeración y distribución de aguas.

- Para el sistema de refrigeración se ha realizado un cambio de refrigeración mixta (circuito cerrado que disminuye su calor por medio de intercambiadores de placas por un circuito abierto que utiliza agua de la propia descarga de la turbina) a un circuito de refrigeración cerrado que disminuye el calor por medio de un sistema de tubería en forma de “serpentin” situado en la descarga de la turbina.
- Para el sistema de conducción de aguas se instala un sistema lamelar controlador de sedimentos en desarenador N°1 en Bocatoma Hornitos con la finalidad de reducir el desgaste en la tubería forzada, distribuidor, inyectores y turbina.

#### 1.6.2. Problemática.

El sistema oleo-hidráulico junto con el sistema de control son los encargados de mantener la comunicación y control de las unidades generadoras con el operador, quien se encarga de regular y mantener una constante generación de energía, sobre todo en periodos de abundante flujo de agua, como lo son las temporadas de primavera y verano (desde el 21 de septiembre hasta el 20 de marzo) con tal de aprovechar al máximo la capacidad de generación de la unidad según lo permita el flujo de agua, principalmente para contar con el constante suministro eléctrico hacia el CEN y clientes junto con la generación de ingresos para la compañía.

Durante los últimos 4 años (2020 hasta 2023), la unidad Hornitos durante la operación e inspecciones de mantenimientos se han detectado una alta cantidad de fallas e imprevisto en el sistema oleo hidráulico (por sobre 10 por año) lo cual ha generado un déficit en la operación durante los meses en que existe un aumento significativo en los caudales de los afluentes que alimenta a la central (Rio Juncal y Rio Juncalito) provocando una producción de electricidad por bajo lo estimado para el periodo, llegando a ocurrir detenciones o paradas totales de la unidad debido a fallos de alta complejidad operacional dentro del sistema, como lo es filtros saturados, fugas de sellos y contaminación del aceite con agua, afectando al resto de componentes del sistema.

Contar con una unidad fuera de servicio o en condiciones no optimas de operación implica un no aprovechamiento de los caudales de agua y el no generar ingresos, por lo que este tipo de

máquinas requieren de programas estrictos de mantenimiento que permitan una operación confiable además de una alta disponibilidad ante la necesidad energética de los clientes o del sistema.

Además, según la Ley 20936 ESTABLECE UN NUEVO SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA Y CREA UN ORGANISMO COORDINADOR INDEPENDIENTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL. Artículo 72°-20.- “Compensaciones por indisponibilidad de suministro... En el caso de las empresas generadoras, el monto de las compensaciones no podrá superar por evento el 5% de los ingresos del año anterior, por los conceptos de energía y potencia en el mercado nacional obtenidos por la empresa generadora, de acuerdo con sus balances auditados y con un máximo de veinte mil unidades tributarias anuales.” Por lo que la indisponibilidad de una unidad provoca que la compañía se vea penalizada económicamente.

### 1.6.3. Cantidad de fallas.

Se cuenta con un resumen de la cantidad de fallas desde el 2020 hasta 2023 producidas en el sistema oleo-hidráulico de la Central Hornitos, en donde se separan que área fue la que detecta la falla (operaciones o mantenimiento) además de la forma en que fue detectada, ya sea, por alarma o inspecciones.

Tabla 5. Resumen cantidad de fallas en sistema oleo-hidráulico de Central Hornitos (creación propia).

CANTIDAD DE FALLAS				
Detectada por	2020	2021	2022	2023
Operaciones	14	11	6	14
Mantenimiento	7	2	4	3
Anunciada por	2020	2021	2022	2023
Alarma	12	6	5	8
Inspección diaria	2	5	2	4
Inspección mensual	1	1	0	0
Inspección semestral	0	1	0	0
Inspección anual	6	0	0	0
En operación	0	0	0	2
Detención	0	0	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>21</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>17</b>

### 1.6.4. Disponibilidades y confiabilidades.

A continuación, se encuentran distribuidas por años (desde 2020 hasta 31 de diciembre de 2023) la disponibilidad y confiabilidad de cada mes de la Central Hornitos en la Tabla 6. El resumen de las horas de servicio, horas disponibles para trabajos externos, horas de desconexión programada y horas de fallas internas y externas a la unidad en conjunto con la disponibilidad y confiabilidad mensual de por cada año se encuentran en anexo “HORAS DE SERVICIO,

DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNIDAD HORNITOS.” La confiabilidad es calculada considerando las horas de servicio de la unidad.

Tabla 6. Resumen Disponibilidad y Confiabilidad unidad Hornitos (creación propia).

Resumen últimos 4 años		
Año	Disponibilidad	Confiabilidad
2020	71,93%	99,89%
2021	92,77%	99,38%
2022	90,80%	99,84%
2023	94,09%	99,74%

#### 1.6.5. Taxonomía.

Para entender de manera adecuada en donde se está realizando el diagnostico, se requiere de la taxonomía o desglose desde la compañía hasta los activos o sistemas en estudio, por lo cual, se utiliza de guía la taxonomía según la norma ISO 14224, para jerarquizar la unidad generadora en conjunto con los sistemas y equipos en *Diagrama 5*.

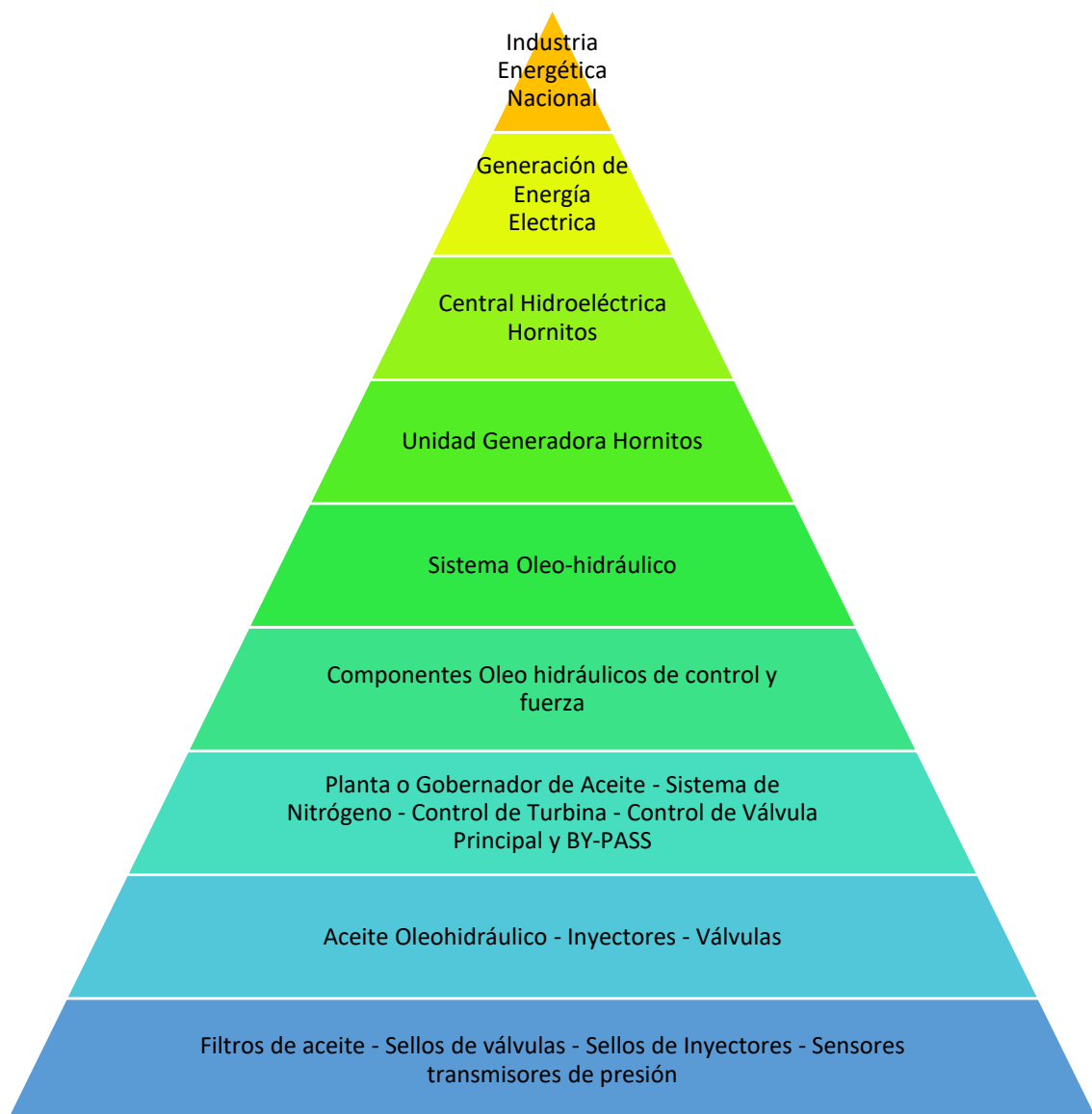


Diagrama 5. Taxonomía según norma ISO 14224. (Creación Propia).

1.6.6. Modos de falla.Sistema crítico: Oleo-hidráulico.

Continuando con el diagnóstico, por medio de la metodología AMEF se determinan los modos de falla relacionados a las fallas presentes los últimos 4 años (promedio de fallas entre los 4 años), tomando como base *International Organization for Standardization. (2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)* para la relación. Posteriormente son evaluadas las potenciales fallas dando con los efectos y consecuencias de estos (*desde Tabla 7 hasta Tabla 14*). En este caso el sistema Oleo-hidráulico es seleccionado al ser un sistema altamente crítico, para facilitar el proceso de diagnóstico se divide al sistema en los siguientes subsistemas:

- Planta de aceite
- Sistema de Nitrógeno
- Control de turbina.
- Control válvula principal y by-pass.

Tabla 7. FMECA Planta de Aceite. P1.

#	Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla
1	Planta de aceite	A	<b>Primaria:</b> Generar la presión adecuada para el correcto funcionamiento del sistema 110-120[bar]	1	<b>Total:</b> No generar la suficiente presión.	A	Filtros saturados
				2	<b>Parcial:</b> Aumento/disminución de nivel de aceite en estanque.	A	Vibración
		B	<b>Secundaria:</b> Almacenar y refrigerar el aceite del estanque.	1	<b>Parcial:</b> Deficiencia en la refrigeración del aceite	A	Fuga externa - Medio de suministro
						A	Transferencia de calor insuficiente

Tabla 8. FMECA Planta de aceite. P2.

FF promedio por año [fallas/año]	Efecto de Falla	Consecuencia de Falla	TPPR horas
4,5	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> No <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Pérdida de propulsión y detención de equipo. <b>Acción correctiva:</b> Cambio de componente.	No se genera la presión de trabajo adecuada del sistema y se requiere detener la unidad generadora.	9
0,5	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> No <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Pérdida de propulsión y detención de equipo. <b>Acción correctiva:</b> Revisión y/o Cambio de componente.	No giran las bombas del sistema oleo-hidráulico, se requiere detener la unidad generadora	2,5

0,75	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Disminución del nivel de aceite en depósito, contaminación en la zona de la fuga. <b>Acción correctiva:</b> Cambio de componente.	Existencia de contaminación hacia el exterior con fluido hidráulico si disminuye el nivel o contaminación del fluido hidráulico con agua en caso de aumentar el nivel.	6
1	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> No <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Aumento de la temperatura del aceite en el gobernador/deposito. Posible detención del equipo. <b>Acción correctiva:</b> Limpieza del componente.	Baja capacidad de disipación de calor y disminución de temperatura del fluido hidráulico.	2

Tabla 9. FMECA Sistema de Nitrógeno. P1.

#	Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla
2	Sistema de Nitrógeno	A	<b>Primaria:</b> Mantener la presión hidráulica en un rango de trabajo en el sistema (110-120 [bar]). Capacidad de 70 [bar]	1	<b>Total:</b> Perdida de presión en el depósito de nitrógeno (bajo 70 [bar])	A	Fuga interna o externa - Medio de proceso (nitrógeno)
						B	Lectura errónea

Tabla 10. FMECA Sistema de Nitrógeno. P2.

FF promedio por año [fallas/año]	Efecto de Falla	Consecuencia de Falla	TPPR horas
1	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Aumento de presión interna de aceite en depósito de Nitrógeno. <b>Acción correctiva:</b> Revisión y/o cambio de componente.	Aumento de presión de aceite en interior de acumulador Perdida de nitrógeno en el sistema Baja presión en sistema de nitrógeno	10
1	<b>Evidente / No evidente:</b> No Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Variación de presión en sistema de Nitrógeno. <b>Acción correctiva:</b> Reemplazo de componentes.	Inexactitud en lecturas de presión de nitrógeno. Error en la operación.	10

Tabla 11. FMECA Control de turbina. P1.

#	Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla
3	Control de turbina	A	<b>Primaria:</b> Regular y distribuir la cantidad de agua hacia la turbina. Apertura y cierre de los deflectores para el arranque y detención de la unidad.	1	<b>Total:</b> Regulación deficiente para la demanda de carga.	A	Fuga interna en servo válvulas
						B	Desgaste de componentes -Anillos -Toberas -Agujas
				2	<b>Parcial:</b> Fuga de fluidos. Perdida de presión.	A	Desgaste de los sellos por abrasión del agua para la generación.

Tabla 12. FMECA Control de turbina. P2.

FF promedio por año [fallas/año]	Efecto de Falla	Consecuencia de Falla	TPPR horas
1	<b>Evidente / No evidente:</b> No Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Pérdida de control de la regulación de carga. <b>Acción correctiva:</b> Limpieza o Cambio de componente.	Pérdida de movimiento de servo válvulas. Fallas en el control de la generación. Contaminación cruzada entre fluidos Taponamiento/atascamiento de válvulas	45
1	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Disminución de fluido hidráulico. Pérdida de control fino del inyector <b>Acción correctiva:</b> Cambio de componentes del inyector.	Pérdida de regulación de generación en la unidad generadora. Contaminación del agua de generación con aceite	30
1	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Disminución en la presión del sistema oleo-hidráulico. <b>Acción correctiva:</b> Cambio de componente.	Contaminación del fluido hidráulico o del agua de generación. Pérdida de generación optima	30

Tabla 13. FMECA Control válvula principal y by-pass. P1.

#	Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla
4	Control válvula principal y by-pass	A	Primaria: Apertura y cierre de la válvula principal y válvula by-pass	1	<b>Total:</b> No apertura/cierre de las válvulas	A	No funcionamiento de válvula secuencial
				2	<b>Parcial:</b> Fuga de fluidos. Pérdida de presión.	A	Fuga interna en servo válvulas

Tabla 14. FMECA Control válvula principal y by-pass. P2.

FF promedio por año [fallas/año]	Efecto de Falla	Consecuencia de Falla	TPPR horas
1	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> No <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Pérdida funcionamiento del componente y detención de equipo. <b>Acción correctiva:</b> Mantenión o cambio de componente.	No apertura o cierre de válvula principal. Contaminación del fluido hidráulico o del agua de la generación. (Aumento o disminución del nivel del fluido en gobernador)	14
0,75	<b>Evidente / No evidente:</b> Evidente <b>Afecta SHA:</b> Si <b>Efecto operacional (síntomas):</b> Aumento/disminución de nivel en depósito de aceite. Pérdida de control de la regulación del sistema oleo-hidráulico <b>Acción correctiva:</b> Cambio de componente.	Contaminación hacia el medio ambiente. Contaminación en los componentes que forman parte del sistema oleo hidráulico y son accionados por este.	10,5

1.6.7. Plan de mantenimiento actual.

El Complejo hidroeléctrico tiene implementado el Sistema de Gestión de Mantenimiento corporativo con herramienta SAP PM.

En base a lo establecido por las pautas de mantenimiento para la central Hornitos, se tiene que se realizan 2 grandes detenciones en el año, denominadas como mantenimiento preventivo básico (MPB) cada 6 meses y mantenimiento mayor (MM) 1 vez al año, siendo principalmente las fechas los meses de mayo-junio y octubre-noviembre.

El Mantenimiento preventivo básico y Mayor de las unidades y Obras Hidráulicas es realizado por personal propio junto con asistencia de empresas externas calificadas.

En caso de atención de Fallas críticas cuya alcance y especialización supere las capacidades internas, se recurre al apoyo de los especialistas de ingeniería de Colbún S.A., a la contratación de empresas especializadas externas y/o especialistas de fabricante original del equipo.

El plan de mantenimiento preventivo básico para cada uno de los sistemas, subsistemas y componentes se basa en tareas preventivas y correctivas entre las cuales se encuentran las siguientes actividades:

- Inspección visual de todos los componentes.
- Limpieza externa de componentes.
- Verificación de fugas en válvulas y conexiones.
- Pruebas de presión a las bombas.
- Controlar la presión de nitrógeno.

Además, se realizan tareas predictivas como monitoreo de vibraciones a los equipos rotativos cada mes, verificación de estado y micro filtrado de lubricantes cada 6 meses y termografías a tableros eléctricos cada 2 meses.

Las actividades correctivas, muchas veces imprevistas, generan detenciones de grandes periodos de tiempo, a su vez causando daños en los equipos y sistemas, reduciendo significativamente de las horas anuales proyectadas en operación.

Esta información es recopilada de las planillas de mantenimiento que se poseen para la central Hornitos, esto debido a que según el sistema o grupo de componentes es que se cuenta con una planilla con las actividades a realizar.

En el Mantenimiento Mayor de la central se realiza a los componentes pertenecientes a los sistemas oleo-hidráulicos y neumáticos pruebas de estanqueidad con los fluidos de trabajo pertinentes (Aceite hidráulico, nitrógeno, agua, aire) en taller mecánico ubicado en Central Los Quilos por personal de Mantenimiento de la empresa.

Por ejemplo, para la válvula secuencial de la Unidad Hornitos se tiene el siguiente plan:

- 1) Se comprueba efectividad de la estanqueidad en la línea P con una presión de 55 [bar], por 15 [min].
- 2) Prueba oleo-hidráulica de accionamiento del pistón, con central hidráulica portátil a una presión de prueba de 120 [bar].
- 3) Prueba de paso de presión de la línea P a línea A.



**CAPITULO 2. PROPUESTA DE MEJORA.**



## **2. PROPUESTA DE MEJORA.**

Continuando con diagnosticar el actual estado de la unidad generadora Hornitos, se procede a analizar los resultados para determinar un plan de mejora acorde a la unidad, que, además, sirva como base para otras unidades generadoras de similares características.

### **2.1. ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LA UNIDAD GENERADORA.**

El sistema oleo-hidráulico trabaja en conjunto con los demás sistemas que conforman a una unidad hidroeléctrica, y su diagnóstico previo logró determinar su importancia para la generación eléctrica, debido a que este es el encargado de accionar y entregar información hacia los diversos componentes y sistemas, como lo es con el sistema de control o el sistema de distribución de aguas.

#### **2.1.1. Identificación de potenciales causas de fallas.**

Posterior a organizar las fallas por su tipo y subsistema (*Anexo*

TABLA DE FALLAS.) cuantificados en cantidad (*Tabla 5*) e identificados los modos de falla correspondientes (*Modos de falla.*) se inicia el análisis.

Son consideradas las fallas con mayor cantidad de ocurrencias entre los subsistemas como lo son Desgaste (28) y Saturación de filtros (18) (*ver Tabla 43*). Para esto se hará uso de diagramas “causa-efecto” o “Ishikawa” (*Diagrama 6 y Diagrama 7*) en conjunto con la metodología “5 por qué” (*Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17*), debido a que son herramientas utilizadas por el comité paritario del complejo para el análisis de incidentes y accidentes. Además, estas herramientas permiten desarrollar hipótesis adecuadas para enfocar las medidas y permitir realizar un análisis más profundo sobre la causa raíz del problema de manera más entendible en su difusión.

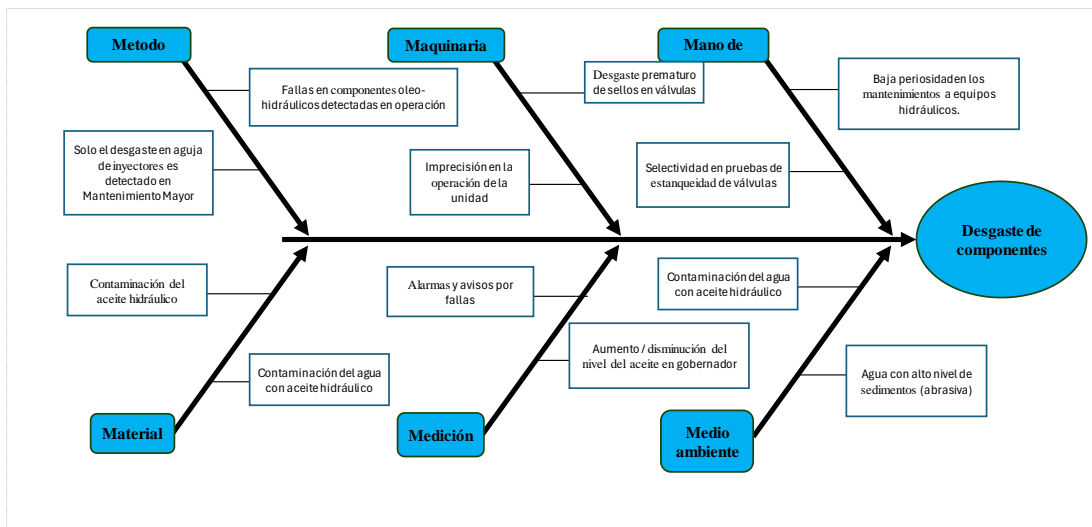


Diagrama 6. Desgaste de componentes (Creación propia).

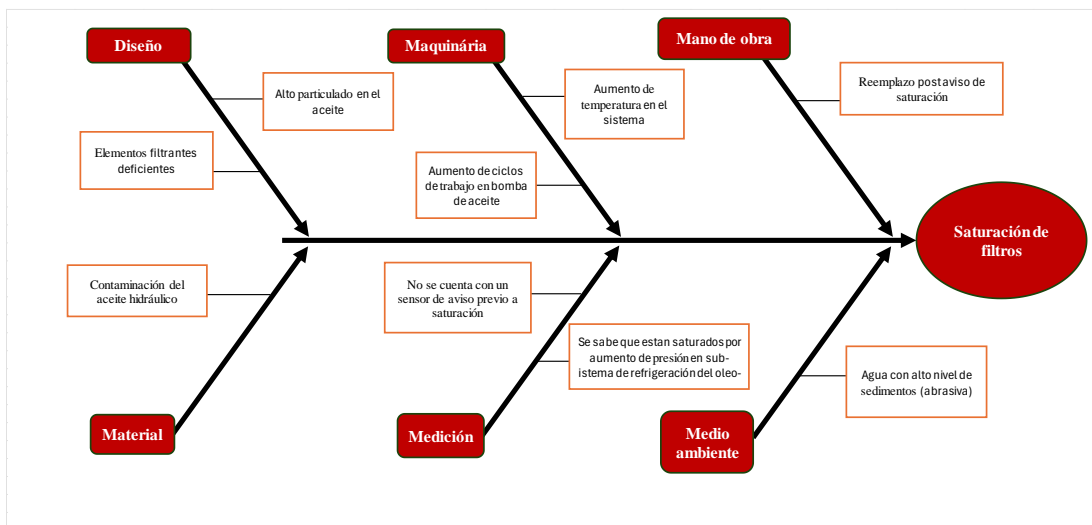


Diagrama 7. Saturación de filtros (Creación propia).

Como complemento de análisis causa-efecto, se utiliza la metodología “5 por qué” para identificar y determinar la o las causas raíz de ambos problemas. Los problemas detectados con la metodología se denominan por código.

Tabla 15. 5 POR QUÉ Contaminación de aceite (creación propia).

PROBLEMA		Contaminación de aceite		CÓDIGO		CAC		
¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	Código		
Fuga en los componentes que trabajan con agua y aceite oleo-hidráulico	Desgaste prematuro de los sellos	Fluidos (agua y/o aceite) muy abrasivos	El agua utilizada presenta alta presencia de sedimentos	El control para reducir los sedimentos en el agua no es efectivo		<b>CAC1</b>		
			El aceite presenta alto material particulado	Los filtros no trabajan correctamente		<b>CAC2</b>		
		Mala calidad del material del sello	Material de menor coste					
	Desgaste de la estructura interna del componente	Cavidades internas de diseño complejo	Diseño del fabricante					
			Presencia de oxido en el interior	Aceite contaminado con agua	Fugas en equipos que trabajan con ambos fluidos		<b>CAC3</b>	
			Material con el que está fabricado no es el adecuado					

Tabla 16. 5 POR QUÉ Saturación de filtros (creación propia).

PROBLEMA		Saturación de filtros		CÓDIGO		SAF	
¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	Código	
Por presencia de partículas contaminantes en el aceite.	Por contaminación del aceite con agua y minerales.	Por fugas en sellos en componentes que trabajen con ambos fluidos.	Por desgaste debido a la alta presencia de minerales en el agua.	El control para reducir los sedimentos en el agua no es efectivo		<b>SAF1</b>	
	Desgaste interno de componentes.	Deficiencia en la lubricación.	Aceite en malas condiciones.	Deficiencia en la inspección y micro filtrado.		<b>SAF2</b>	
Por desgaste de los componentes.	Por mala lubricación del aceite.	Por pérdida de las propiedades del aceite.	Por contaminación del aceite con agua.	Por fugas en sellos en componentes que trabajen con ambos fluidos.		<b>SAF3</b>	
	Por vida útil de los componentes	No se realiza el mantenimiento adecuado.	Personal no capacitado.				
			Planificación del mantenimiento.	Las tareas de mantenimiento solo se basan en inspecciones visuales. Las pruebas de componentes solo es 1 vez al año.		<b>SAF4</b>	

Por no ser reemplazados a tiempo.	Porque se desconoce su estado de saturación.	Por fallas/falta de función en los sensores de saturación de filtros.	Los sensores entregan un máximo o mínimo de saturación, no un constante estado de estos.	Por programación de funcionamiento del sistema	<b>SAF5</b>
	Por planificación del plan de mantenimiento.	Porque los filtros se saturan antes de lo planificado.	Alta presencia de particulado en el aceite	Desgaste de componentes y/o contaminación del aceite.	<b>SAF6</b>

Tabla 17. 5 POR QUÉ Falla en componentes hidráulicos (creación propia).

PROBLEMA		Fallas en componentes oleo-hidráulicos		CÓDIGO	FCO	
¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	Código	
Producto del desgaste y contaminación en el interior.	Abrasión de los fluidos.	El agua utilizada presenta alta presencia de sedimentos.	Los decantadores de material se encuentran saturados.	Por no limpieza del fondo de estos.	<b>FCO1</b>	
		El aceite presenta alto material particulado.	Los filtros no trabajan correctamente.	Son reemplazados post alarma de saturación.	<b>FCO2</b>	
				Los trabajos de microfiltros no son efectivos.	<b>FCO3</b>	
	Desgaste prematuro de los sellos internos.	Mala calidad de los sellos.	Material de menor coste.			
		Fluidos abrasivos.				
	Por mantenimiento ineficiente.	Inspecciones cada 1 años.	Por planificación del mantenimiento.	El Mantenimiento Mayor se realiza 1 vez al año, realizando de manera selectiva el mantenimiento adecuado a las válvulas	Se aprecia que el plan de mantenimiento sobre los componentes hidráulicos no está siendo efectivo sobre los componentes afectados por el desgaste prematuro.	<b>FCO4</b>
La política interna de gestión de activos establece mantenimientos a corto y largo plazo						
Pruebas de estanqueidad realizadas a pocas válvulas.		Historial de mantenimiento.	Son válvulas que "constantemente" fallaron en el pasado.	No eran atendidas debidamente.	<b>FCO5</b>	
		Escases de personal capacitado.	Del grupo de Mecánicos (6) existe un especialista por área.	Se plante la idea de "subcontratación" y que el personal mecánico cumpla rol de "ITTO".	<b>FCO6</b>	

## 2.2. PLAN DE ACCIÓN.

Posterior al análisis se realiza un plan de acción para cada problema detectado, para esto se utiliza el “Árbol de decisión” (ver Anexo *ÁRBOL DE DECISIONES*.) como herramienta propuesta por Society of Automotive Engineers. (1999). *Norma SAE JA1011 – Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*, debido principalmente a su simple y efectivo uso para la toma de decisiones respecto a las tareas que implican consecuencias en la higiene, seguridad, operación y mantenimiento de los equipos.

Los planes de acción se dividen según las 3 principales causas raíz detectadas en los diagramas Ishikawa, continuando con el orden establecido en los “*diagramas de 5 por qué*”, donde cada tarea propuesta cuenta un código de identificación que lo vincula a la problemática detectada (Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20).

Para cada tarea existe una o más propuestas de mejoras relacionadas a mejoras en actividades de mantenimiento como aumento en los ciclos de inspecciones, mejora a los equipos y reemplazo de componentes como filtros por filtros de mayor capacidad de filtración.

Tabla 18. Plan de acción "Contaminación de aceite". (Creación propia)

PLAN DE ACCIÓN CONTAMINACIÓN DE ACEITE			
Código	Nombre de tarea	Propuesta	Posición árbol de fallas
CAC1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	1. Complementar el sistema de lamelas existente en desarenador N°2, instalando lamelas en el desarenador N°1. 2. Realizar aseos o apertura de compuertas en bocatoma Hornitos, de forma constante para lograr el paso de material grueso que llega desde el afluente.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN
CAC2	REEMPLAZO DE FILTROS	1. Se agregará como complemento de filtrado un elemento filtrante de menor tamaño (3 [µm]) en serie post elemento filtrante actual para complementar el filtrado de partículas pequeñas. 2. La alarma de cambio de filtro se presentará a un 80% de capacidad del filtro, principalmente para programar la tarea de recambio previo a su saturación completa.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN
CAC3	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	1. Realizar pruebas de funcionamiento cada 6 meses a las válvulas oleo-hidráulicas. 2. Realizar reacondicionamiento en Mantenimiento Mayor.	S2 REACONDICIONAMIENTO CICLICO

Tabla 19. Plan de acción "Saturación de filtros" (creación propia).

PLAN DE ACCIÓN SATURACIÓN DE FILTROS			
Código	Nombre de tarea	Propuesta	Posición árbol de fallas
SAF1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	1. Complementar el sistema de lamelas existente en desarenador N°2, instalando lamelas en el desarenador N°1. 2. Realizar aseos o apertura de compuertas en bocatoma Hornitos, de forma constante para lograr el paso de material grueso que llega desde el afluente.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN
SAF2	MEJORA A MICROFILTRADO	1. Realizar análisis de viscosidad de aceite y comparar con viscosidad requerida para el correcto funcionamiento de los componentes. 2. Reducir los intervalos de micro filtrado al aceite, realizando cada 3 meses la tarea predictiva para mantener el aceite en el mejor estado. Sujeto a evaluación	H1 TAREA A CONDICIÓN

SAF3	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	1. Realizar pruebas de funcionamiento cada 6 meses a las válvulas oleo-hidráulicas. 2. Realizar reacondicionamiento en Mantenimiento Mayor.	O2 REACONDICIONAMIENTO CÍCLICO
SAF4	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	1. Realizar pruebas de funcionamiento cada 6 meses a las válvulas oleo-hidráulicas. 2. Realizar reacondicionamiento en Mantenimiento Mayor.	O2 REACONDICIONAMIENTO CÍCLICO
SAF5	REEMPLAZO DE SENSORES	1. Reemplazo de los sensores por sensores que detecten la capacidad actual del filtro. 2. Actualización de software de control.	O REDISEÑO
SAF6	REEMPLAZO DE FILTROS	1. Se agregará como complemento de filtrado un elemento filtrante de menor tamaño (3 [µm]) en serie post elemento filtrante actual para complementar el filtrado de partículas pequeñas. 2. La alarma de cambio de filtro se presentará a un 80% de capacidad del filtro, principalmente para programar la tarea de recambio previo a su saturación completa.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN

Tabla 20. Plan de acción "Fallas en componentes oleo-hidráulico" (creación propia).

PLAN DE ACCIÓN FALLAS DE COMPONENTES OLEO-HIDRÁULICOS			
Código	Nombre de tarea	Propuesta	Posición árbol de fallas
FCO1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	1. Complementar el sistema de lamelas existente en desarenador N°2, instalando lamelas en el desarenador N°1. 2. Realizar aseos o apertura de compuertas en bocatoma Hornitos, de forma constante para lograr el paso de material grueso que llega desde el afluente.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN
FCO2	REEMPLAZO DE FILTROS	1. Se agregará como complemento de filtrado un elemento filtrante de menor tamaño (3 [µm]) en serie post elemento filtrante actual para complementar el filtrado de partículas pequeñas. 2. La alarma de cambio de filtro se presentará a un 80% de capacidad del filtro, principalmente para programar la tarea de recambio previo a su saturación completa.	O REDISEÑO O1 TAREA A CONDICIÓN
FCO3	MEJORA A MICROFILTRADO	1. Realizar análisis de viscosidad de aceite y comparar con viscosidad requerida para el correcto funcionamiento de los componentes. 2. Reducir los intervalos de micro filtrado al aceite, realizando cada 3 meses la tarea predictiva para mantener el aceite en el mejor estado. Sujeto a evaluación	H1 TAREA A CONDICIÓN
FCO4	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	1. Realizar pruebas de funcionamiento cada 6 meses a las válvulas oleo-hidráulicas. 2. Realizar reacondicionamiento en Mantenimiento Mayor.	O2 REACONDICIONAMIENTO
FCO5	REEMPLAZO DE VÁLVULAS	1. Reemplazo de válvulas por otras de mayor simplicidad en sus cavidades internas.	O REDISEÑO
FCO6	CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES	1. Se propone capacitar a todo el personal en las pruebas realizadas para el control y reacondicionamiento de estos equipos. 2. Gestionar la presencia de más especialistas hidráulicos, desde otras centrales de la compañía, para apoyo durante los mantenimientos mayores.	

Dentro de los planes de acción se comparten actividades como lo son “CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA”, “REEMPLAZO DE FILTROS”, “MEJORA A MICROFILTRADO”, “MANTENIMIENTO DE VÁLVULAS”. Esto debido a que factores como sedimentos en el agua de generación o alto particulado en el aceite generan estas fallas en el sistema.

Si bien para las principales causas raíz detectadas se crea un plan de acción en específico, se busca satisfacer las otras dentro de la propuesta contando con tareas que sean un complemento al actual plan de mantenimiento, principalmente optimizando tareas en las que el departamento de

Operaciones y Mantenimiento trabajan en conjunto en la detección de anomalías y fallas, así como en una óptima operación de la unidad generadora

En resumen, se abarcan 3 causas principales de las fallas que se ven relacionadas en los modos de falla y en las tareas de mantenimiento propuestas. Por lo que, el plan de acción general para la unidad generadora Hornitos es el siguiente (*Tabla 21*):

*Tabla 21. Propuesta de Plan de Acción General*

PLAN DE ACCIÓN GENERAL		
Nombre de tarea	Propuesta	Tiempo
CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES	1. Se propone capacitar a todo el personal en las pruebas realizadas para el control y reacondicionamiento de estos equipos. 2. Gestionar la presencia de más especialistas hidráulicos, desde otras centrales de la compañía, para apoyo durante los mantenimientos mayores.	1. Gestionar capacitación durante el año. 2. En Mantenimiento Mayor
CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	1. Complementar el sistema de lamelas existente en desarenador N°2, instalando lamelas en el desarenador N°1. 2. Realizar aseos o apertura de compuertas en bocatoma Hornitos, de forma constante para lograr el paso de material grueso que llega desde el afluente.	1. En Mantenimiento Mayor. 2. Cada 48 horas por parte de personal de operaciones
MEJORA A MICROFILTRADO	1. Realizar análisis de viscosidad de aceite y comparar con viscosidad requerida para el correcto funcionamiento de los componentes. 2. Reducir los intervalos de micro filtrado al aceite, realizando cada 3 meses la tarea predictiva para mantener el aceite en el mejor estado. Sujeto a evaluación	1. Cada Mantenimiento Mayor 2. Cada 3 meses (sujeto a evaluación)
MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	1. Realizar pruebas de funcionamiento cada 6 meses a las válvulas oleo-hidráulicas. 2. Realizar reacondicionamiento en Mantenimiento Mayor.	1. Cada 6 meses 2. Cada Mantenimiento Mayor
REEMPLAZO DE SENSORES	1. Reemplazo de los sensores por sensores que detecten la capacidad actual del filtro. 2. Actualización de software de control.	1. En Mantenimiento Mayor. 2. En Mantenimiento Mayor
REEMPLAZO DE FILTROS	1. Se agregará como complemento de filtrado un elemento filtrante de menor tamaño (3 [µm]) en serie post elemento filtrante actual para complementar el filtrado de partículas pequeñas. 2. La alarma de cambio de filtro se presentará a un 80% de capacidad del filtro, principalmente para programar la tarea de recambio previo a su saturación completa.	1. Según condición propuesta. 2. Según condición propuesta.
REEMPLAZO DE VÁLVULAS	1. Reemplazo de válvulas por otras de mayor simplicidad en sus cavidades internas.	1. En Mantenimiento Mayor

Cada tarea propuesta trae consigo acciones de mejora que buscan reducir las fallas y detenciones por Saturación de Filtros, Contaminación de aceite y Fallas en componentes oleo-hidráulicos, esto con la finalidad de mantener la disponibilidad de la unidad generadora por sobre el 90%, la cual hasta la fecha se ha mantenido cercana a un 60% (ver anexo HORAS DE SERVICIO, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNIDAD HORNITOS.) A continuación, se señala en detalle las propuestas:

A. Capacitación y solicitud de trabajadores: Capacitar los trabajadores implica que el equipo de Mecánicos con el que cuenta la empresa estén todos capacitados y aptos para trabajar en sistemas oleo-hidráulicos. Con esto se espera que el

mantenimiento de las válvulas y componentes de los sistemas oleo-hidráulicos de las unidades generadores pueda ser realizado por todos del equipo y no recaigan las labores solo en un especialista.

La solicitud de trabajadores se basa en que, a nivel de compañía, el Complejo Hidroeléctrico Aconcagua pueda realizar la petición de especialistas (para este caso en sistemas oleo-hidráulicos) pertenecientes a la compañía ubicados en las diversas centrales de generación a lo largo del país, para complementar las labores de trabajo en actividades de Mantenimiento Mayor de la unidad.

**B. Control de sedimentos en agua:** En bocatoma Hornitos actualmente se cuenta con 2 desarenadores que trabajan en paralelo, es decir, el agua captada desde el río Juncal es guiada por un canal que se divide en 2 para direccionar las aguas por los desarenadores. En el desarenador N°2 se cuenta con un sistema captador de “lamelas” el cual aporta a la disminución de sedimentos en el agua, pero producto de sedimentos de gran tamaño (rocas tipo bolones) este se encuentra fuera de servicio. Por lo que, como mejora se propone complementar al captador de lamelas instalando uno en el desarenador N°1.

La segunda parte de la propuesta consiste en realizar una limpieza de manera constante (cada 48 [horas] como medida inicial) equivalente a la apertura de compuertas previas a los desarenadores (*Ilustración 12*) para limpiar el canal de los sedimentos de mayor tamaño y evitar el no funcionamiento de los captadores de lamelas. El tiempo de apertura puede verse diferenciado ya que será responsabilidad del operador estar al corriente de la cantidad de material en el canal mediante la visualización de las cámaras.



*Ilustración 12. Desarenador 1 y 2 en bocatoma Hornitos.*

**C. Mantenimiento a válvulas:** Para el mantenimiento de válvulas se espera que cada 6 meses (en época de Mantenimiento Preventivo Básico y Mantenimiento Mayor) se realicen pruebas de funcionamiento y estanqueidad (ver Plan de mantenimiento

actual.) con tal de diagnosticar y determinar si es viable que permanezcan en funcionamiento o sean retiradas para repuesto o en estado fuera de servicio.

Además, en labores de Mantenimiento Mayor se propone realizar a las válvulas que lo requieran y lo permitan, según las pruebas y fabricante, un reacondicionamiento interno cambiando sellos y limpiando de impurezas o contaminación.

- D. Mejora a micro filtrado: Es fundamental para contar con una película óptima de lubricante con mínimas pérdidas por fricción, previene el contacto metal con metal, desgaste, micro soldadura en frío y ralladuras sobre superficies. Por lo que, realizar un análisis de la viscosidad del aceite por lo menos 1 vez al año permitirá tener conocimiento de su estado actual y determinar si se continúa el programa de micro filtrado, si por medio de aditivos el aceite puede perdurar en el tiempo o bien debe ser reemplazado en su totalidad.

Para las tareas de micro filtrado se propone aumentar de trabajos durante el año, es decir, que esta actividad predictiva sea realizada cada 3 meses, esto sujeto a evaluación. Realizar esta actividad de manera constante se espera que permita mantener bajas la cantidad de partículas en el aceite. Se espera una disminución en la pérdida de sellado de elementos componentes oleo hidráulicos, como puede ser válvula secuencia, by-pass o principal, así como también los sellos aceite-nitrógeno del acumulador del sistema de nitrógeno.

- E. Reemplazo de filtros: El circuito de recirculación cuentan con un filtro “0160 DN 010 BN4HC /-V” de la marca HYDAC con capacidad de filtrado entre 5 a 14 [ $\mu\text{m}$ ] aproximadamente (*ver Anexo E*), se propone agregar a continuación el filtro “0160 DN 003 BH4HC /-V” de la marca HYDAC de una capacidad de filtrado entre 3 a 6 [ $\mu\text{m}$ ], como complemento a la filtración de partículas pequeñas (*ver Ilustración 13*).

El reemplazo de ambos filtros será según su condición, es decir, se actualizará el sistema de monitoreo por sensores, complementando con transmisor de presión MBS 2050 para poder determinar de manera adecuada el nivel de saturación de filtros. Al estar esta aun 80% se espera dar aviso para su pronto reemplazo. (esto aplicado en filtro de recirculación y el filtro nuevo de la propuesta). En los planos indicados en *PLANOS SISTEMA OLEO-HIDRÁULICO UNIDAD HORNITOS*. Están indicados como **MEX10 AT001** (*Ilustración 16*) y **MEX14 AT051** (*Ilustración 17*).



**CAPITULO 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.**



### 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.

En el presente capítulo se evalúa la relación costo-beneficio de la implementación de la propuesta de mejora, comparándola con los costos generadores actualmente por las fallas y posteriormente determinar su factibilidad.

#### 3.1. DETERMINACIÓN DE COSTOS.

En la industria de la generación de energía eléctrica los costos fijos y costos por no producción están determinados por la Comisión Nacional de Energía y el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) en cumplimiento de lo establecido en el artículo 162° de la Ley General de Servicios Eléctricos, debe determinar un programa de obras de generación y transmisión para el Sistema Eléctrico Nacional, que minimice el costo total actualizado de abastecimiento de energía eléctrica, esto es, la suma de los costos esperados actualizados de inversión, operación y racionamiento en el proceso de fijación de precios de nudo de corto plazo.

El (Energía, 2024) establece que “A partir del Estudio de Costos de Inversión, desarrollado por INODU (consultora), se determinaron costos de inversión unitarios [kUS\$/MW], asociados a distintas capacidades instaladas referenciales por tecnología, cuyos valores indexados a febrero 2024 se presentan a continuación”, en la siguiente tabla (*Tabla 22*).

*Tabla 22. Costos de Inversión ([kUS\$/MW]) - Estudio de Determinación de Costos por Tecnología de Generación.*

Tipo de sistema	Capacidad	Costos Unitario [kUSD/MW]	Comentario
Ciclo Abierto	211 [MW]	816	
Ciclo Combinado	630 [MW]	1086	
Conjuntos motores a Gas	108 [MW]	1081	
	46[MW]	1378	
Hidroeléctrica de Pasada	2.9 [MW]	4141	Altamente dependiente del emplazamiento
	52 [MW]	4746	Altamente dependiente del emplazamiento
Hidroeléctrica de Embalse	78.3 [MW]	5369	Altamente dependiente del emplazamiento
Solar Fotovoltaica	3 - 9 [MW]	1040-1125	
	50 - 100[MW]	744-832	
Eólica	100 - 250 [MW]	1551-1604	
Térmica a Biomasa	10 [MW]	4598	Incluye sistema de almacenamiento y preparación biomasa
	10 [MW]	3885	No Incluye sistema de almacenamiento y preparación biomasa
Térmica a Biogás	3.3 [MW]	1384	
Solar Térmica (Concentración)	115 [MW] @ 13 [hrs]	6381	Generación 24 horas
	115 [MW] @ 13 [hrs]	5677	Generación sólo nocturna

	115 [MW] @ 5 [hrs]	5027	
Geotérmica	50 [MW]	8252	Greenfield
	50 [MW]	5291	Brownfield
BESS	5-25 [MW] @ 5 [hrs]	2251-2828	Aplicación gestión de energía ERNC
	10 [MW] @ 0.25 [hrs]	700	Aplicación servicios complementarios
	200 [MW] @ 0.25 [hrs]	400	Aplicación como activo de transmisión (N-1)
Híbrida Solar Fotovoltaica & Almacenamiento	9 [MW] PV; 5 [MW] @ 5 [hrs]	2024	Se considera como base la capacidad de la central PV
	50 - 100 [MW] PV; 25 [MW] @ 5 [hrs]	1093-1588	Se considera como base la capacidad de la central PV
Híbrida Eólica & Almacenamiento	100 [MW]; 25 [MW] @ 5 [hrs]	2014	Se considera como base la capacidad de la central eólica

A continuación, (Tabla 23) se presenta el resumen con la determinación de costos de inversión unitarios ([US\$/Kw]) referenciales para cada una de las tecnologías de generación según las descripciones antes señaladas:

Tabla 23. Costos de inversión referencial unitario ([US\$/kW]) - Fuente: CNE.

Tecnología	Costo de inversión referencial [US\$/kW]
Almacenamiento BESS @2-4 hrs	1,252
Almacenamiento BESS @4-6 hrs	1,556
Solar	771
solar PMGD	941
Solar Térmica	6,381
Eólica	1,534
Geotérmica	5,291
Térmica a gas natural (CC)	1,086
Térmica a gas natural (CA)	816
Térmica a biomasa	3,885
Térmica a biogás	1,384
Térmica Diésel	487
Hidráulica de embalse	5,369
Hidro-pasada	4,746
Mini Hidro-Pasada	2,274
Eólica + Almacenamiento @4-5 [hrs/50%Pnom]	1,727
Solar + Almacenamiento @2-4 [hrs/70%Pnom]	1,503
Solar + Almacenamiento @4-8 [hrs/90%Pnom]	1,762

A partir de la información de los proyectos en construcción y estudio, la Comisión Nacional de Energía cuenta con antecedentes insuficientes para obtener un costo de inversión unitario referencial... En atención a lo anterior, se ha decidido utilizar los costos determinados en el Estudio de Costos de Inversión desarrollado por INODU, esto es, un valor de 4,746 [US\$/kW].

### 3.1.1. Costos fijos.

Los costos fijos o directos corresponden a los costos fijos de operación, mantenimiento y administración (COMA) necesarios para mantener en operación una unidad generadora y que son independientes del nivel de generación de energía de esta. Estos costos consideran, entre otros, sueldos, contratos de mantenimiento, etc.

$$CF_i = (P_{bruta} * CF_{o\&m})_i$$

Donde,

- $CF_i$ : Costos fijos totales en el periodo  $i$ -ésimo.
- $P_{bruta}$ : Potencia bruta de la unidad generadora.
- $CF_{o\&m}$ : Costos fijos de operación y mantenimiento.

De manera referencial para las distintas tecnologías en (Energía, 2024) se ha determinado un porcentaje del valor de inversión que representa los costos fijos de cada central. Estos valores se presentan en Tabla 24 a continuación:

Tabla 24. Costos fijos por tecnología (% valor de inversión) - Fuente: CNE.

Tecnología	Costos fijos (% valor de inversión)
Térmica a Gas Natural Ciclo Abierto	2% - 3%
Térmica a Gas Natural Ciclo Combinado	1%-2%
Térmico diésel	1% - 2%
Eólica	1%-2%
Solar fotovoltaica	1%-2%
Solar Térmica (Concentración)	1%-2%
Hidráulica de Pasada (> 20 [MW])	2% - 3%
Minihidráulica (< 20 [MW])	2%-3%
Hidráulica de Embalse	1%
Térmica a Biomasa	1%-2%
Térmica a Biogás	1% - 2%
Geotérmica	2% - 3%
Eólica con Almacenamiento	1%-2%
Solar Fotovoltaica con Almacenamiento	1%-2%
Sistemas de Almacenamiento en Baterías	1%-2%

Para determinar los costos fijos sabemos que para una central hidroeléctrica los COMA equivalen a 4,746 [US\$/kW], y la potencia bruta de la unidad Hornitos, según manual, es de 59,8 [MW] (la potencia neta máxima de trabajo es de 55 [MW]). Para facilitar los cálculos se utiliza un 3% de la inversión según la tabla anterior:

$$CF_i = (59,8 [MW] * (4,746 \left[ \frac{US\$}{kW} \right] * 3\%) * 1000 \left[ \frac{kW}{MW} \right])$$

$$CF_i = \$ 8.546,62 [US\$]$$

Por lo tanto, para los cálculos se utilizarán como Costos fijos el valor de 8.546,62 [US\$] obtenidos según lo propuesto por la Comisión Nacional de Energía en la última versión de *INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO* de mayo de 2024 (Energía, 2024).

### 3.1.2. Costos por no producción.

Los costos por no producción son denominados la cantidad de energía eléctrica que no genera la unidad Hornitos al estar detenida o fuera de servicio. El costo de la energía eléctrica está establecido en un informe anual generado por la Comisión Nacional de Energía (Energía, PRECIO MEDIO DE MERCADO SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (PMM SEN), 2024).

Dentro de este informe se encuentra el Precio Medio de Mercado (PMM) para realizar la evaluación económica se utiliza el valor de 99,394 [\$/kWh] ([CLP/kWh]). Este valor, según el informe, es el valor real hasta la fecha evaluado con el IPC del mes anterior.

Como medida de estudio será considerada la potencia máxima de generación de la unidad Hornitos (55 [MW]), por lo cual, el Precio Medio de Mercado debe ser considerado como [US\$/MW] para mantener el formato del cálculo y la unidad de medida de los costos fijos, para ello el dólar será considerado a 988,91 [CLP].

$$\begin{aligned}
 PMM &= 99,394 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{kWh}} \right] * 1000 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{MWh}} \right] * \frac{1}{988,91} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{CLP}} \right] \\
 PMM &= 100,51 \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{MWh}} \right] \\
 \text{Costo NoProd.} &= PMM * P_{UG} = 100,51 \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{MWh}} \right] * 55 [\text{MW}] \\
 \text{Costo NoProd.} &= 5.526 \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right]
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, los costos por no producción equivalen a 5.526 [US\$/h].

### 3.1.3. Costos por Mano de obra (Horas Hombre).

Los costos por mano de obra (Horas Hombre o HH) para las tareas equivalen a US\$ 40. Conociendo este valor se presentan en las siguientes tablas (*Tabla 25*, *Tabla 26* y *Tabla 27*) los costos equivalentes a horas hombre por cada trabajo realizado en a causa de las fallas, además de tablas los costos equivalentes a horas hombre de las actividades en la propuesta de mejora.

Tabla 25. Costos por Horas Hombre (HH) de las fallas anual. Creación Propia.

#	Componente	#	#	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos promedio por año fallas/año	TPPR horas	Costos de HH por falla	Costos de HH falla/año
1	Planta de aceite	A	1	A	Filtros saturados	4,5	9	\$ 360	\$ 1.620
				B	Vibración	0,5	2,5	\$ 100	\$ 50
		B	1	A	Fuga externa - Medio de suministro	0,75	6	\$ 240	\$ 180
				A	Transferencia de calor insuficiente	1	2	\$ 80	\$ 80
2	Sistema de Nitrógeno	A	1	A	Fuga interna o externa - Medio de proceso (nitrógeno)	1	10	\$ 400	\$ 400
				B	Lectura errónea	1	10	\$ 400	\$ 400
3	Control de turbina	A	1	A	Fuga interna en servo válvulas	1	45	\$ 1.800	\$ 1.800
				B	Desgaste de componentes -Anillos -Toberas -Agujas	1	30	\$ 1.200	\$ 1.200
				A	Desgaste de los sellos por abrasión del agua para la generación.	1	30	\$ 1.200	\$ 1.200
4	Control válvula principal y by-pass	A	1	A	No funcionamiento de válvula secuencial	1	14	\$ 560	\$ 560
				2	A	Fuga interna en servo válvulas	0,75	10,5	\$ 420
<b>Total, costos HH</b>								<b>\$ 6.760</b>	<b>\$ 7.805</b>

Para calcular los costos por Horas Hombre de las actividades pertenecientes a la propuesta de mejora se considera el personal requerido para cada actividad, el tiempo de duración aproximado en horas y la frecuencia anual de la actividad. Con estos datos se realiza el estimativo al coste de Horas Hombre por cada actividad realizada y el coste de Horas Hombre Total durante el año.

Tabla 26. Costos por Hora Hombre de la propuesta de mejora pt1. Creación propia.

Código	Nombre tarea	Tarea 1	Personal requerido	Tiempo de ejecución HH	Frecuencia Anual	Costos de HH por falla	Costos de HH falla/año
CAC1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	Instalación de sistema extractor de lamelas	8	100	1	\$ 32.000	\$ 32.000
CAC2	REEMPLAZO DE FILTROS	Instalación de Filtros de aceite para partículas más finas	2	8	1	\$ 640	\$ 640
CAC3	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	Pruebas a Válvulas	6	2	2	\$ 480	\$ 960
FCO3	MEJORA A MICROFILTRADO	Medición de viscosidad del aceite con Viscosímetro	1	2	1	\$ 80	\$ 80
FCO5	REEMPLAZO DE VÁLVULAS	Reemplazo de Válvulas Hidráulicas	2	2	1	\$ 16	\$ 160
FCO6	CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES	Cursos de capacitación en sistemas oleo-hidráulicos	6	20	1	\$ 4.800	\$ 4.800

SAF5	<b>REEMPLAZO DE SENSORES</b>	Reemplazo de sensores tipo transmisores de presión	2	2	1	\$ 160	\$ 160
<b>Total, general</b>						<b>\$ 38.320</b>	<b>\$ 38.800</b>

Tabla 27. Costos por Hora Hombre de la propuesta de mejora pt2. Creación propia.

Código	Nombre tarea	Tarea 2	Personal requerido	Tiempo de ejecución HH	Frecuencia Anual	Costos de HH por falla	Costos de HH falla/año
CAC1	<b>CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA</b>	Apertura de compuertas en bocatoma Hornitos	1	1	176	\$ 40	\$ 7.040
CAC2	<b>REEMPLAZO DE FILTROS</b>	Reemplazo de filtros	1	2	8	\$ 80	\$ 640
CAC3	<b>MANTENIMIENTO A VÁLVULAS</b>	Reemplazo de sellos de válvulas Limpieza interna y externa.	2	2	2	\$ 160	\$ 320
FCO3	<b>MEJORA A MICROFILTRADO</b>	Micro filtrado de aceite	1	10	4	\$ 400	\$ 1.600
FCO6	<b>CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES</b>	Traslado de trabajadores	2	40	1	\$ 3.200	\$ 3.200
SAF5	<b>REEMPLAZO DE SENSORES</b>	Actualización de software	1	1	1	\$ 40	\$ 40
<b>Total, general</b>						<b>\$ 3.920</b>	<b>\$ 15.720</b>

### 3.2. COSTOS POR FALLAS.

Los costos por falla están calculados de manera anual, estos costos consideran como datos técnicos la frecuencia de evento promedio por año (al considerar en el estudio 4 años de historial de fallas) en conjunto con el tiempo promedio de reparación requerido para cada falla; como datos económicos se consideran los costos por no producción (5.528 [US\$/hora]) en conjunto con los costos directos por falla (8.547 [US\$/falla]). El costo por Impacto a la seguridad, higiene y ambiente no se considera, puesto que, si bien existen fallas que “contaminan” el agua con aceite hidráulico, la contaminación es mínima en comparación con la cantidad de agua turbinada.

Por cada modo de falla ocurrido durante los ultimo 4 años (desde 2020 hasta finales de 2023) se utilizan los datos técnicos y económicos anteriormente mencionados, dando como resultado el *Riesgo* [US\$/año] o Costos por falla anual [US\$/año] (Tabla 28).

Estos costos se ven altamente influenciados por los costos directos y los costos por no producción, más que por los costos de mano de obra.

Tabla 28. Costos por falla anual. (Creación propia).

#	Componente	#	#	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos promedio por año fallas/año	TPPR horas	Costos No Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Costos por falla anual [US\$/año]	
1	Planta de aceite	A	1	A	Filtros saturados	4.5	9	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 262,343	
				B	Vibración	0.5	2.5	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 11,183	
		B	1	A	Fuga externa - Medio de suministro	0,75	6	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 31,286	
				A	Transferencia de calor insuficiente	1	2	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 19,603	
2	Sistema de Nitrógeno	A	1	A	Fuga interna o externa - Medio de proceso (nitrógeno)	1	10	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 63,826	
				B	Lectura errónea	1	10	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 63,826	
3	Control de turbina	A	1	A	Fuga interna en servo válvulas	1	45	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 257,306	
				B	Desgaste de componentes -Anillos -Toberas -Agujas	1	30	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 174,386	
		2	A	1	A	Desgaste de los sellos por abrasión del agua para la generación.	1	30	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 174,386
					A	No funcionamiento de válvula secuencial	1	14	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 85,938
4	Control válvula principal y by-pass	A	2	A	Fuga interna en servo válvulas	0.75	10.5	\$ 5,528	\$ 8,547	\$ 0	\$ 49,943	
			<b>Total</b>					<b>13.5</b>	<b>169</b>			

### 3.3. COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA.

Los costos relacionados al plan de acción propuesto están compuestos por la suma de los costos de los insumos y los costos por mano de obra, estos multiplicados por la frecuencia anual para realizar estos trabajos (Tabla 29 y Tabla 30). Dentro de la propuesta existen tareas que son solo para realizar 1 vez, es decir, son mejoras o actualizaciones de parte de los sistemas para reducir el impacto y/o la cantidad de fallas durante el año siguiente, por lo que estas tareas deben realizarse en la época de Mantenimiento Mayor que estima la compañía, esto para minimizar los costes, principalmente por no producción, al ser una época planificada en donde la unidad estará fuera de servicio por planificación. Estas actividades son:

- Instalación de sistema extractor de lamelas.
- Instalación de Filtros de aceite para partículas más finas.

- Reemplazo de Válvulas Hidráulicas.
- Cursos de capacitación en sistemas oleo-hidráulicos.
- Reemplazo de sensores tipo transmisores de presión.
- Actualización de software.

Tabla 29. Costos de la propuesta de mejora T1. (Creación propia).

Código	Nombre tarea	Tarea 1	Frecuencia Anual	Costos Insumos	Costos HH	Costos Tarea	Costos totales (T1+T2)
CAC1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	Instalación de sistema extractor de lamelas	1	\$ 5,000	\$ 32,000	\$ 37,000	\$ 44.216
CAC2	REEMPLAZO DE FILTROS	Instalación de Filtros de aceite para partículas más finas	1	\$ 500	\$ 640	\$ 1,140	\$ 3.700
CAC3	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	Pruebas a Válvulas	2	\$ 1,000	\$ 480	\$ 2,960	\$ 4.060
FCO3	MEJORA A MICROFILTRADO	Medición de viscosidad del aceite con Viscosímetro	1	\$ 500	\$ 80	\$ 580	\$ 3.780
FCO5	REEMPLAZO DE VÁLVULAS	Reemplazo de Válvulas Hidráulicas	1	\$ 1,050	\$ 160	\$ 1,210	\$ 1.210
FCO6	CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES	Cursos de capacitación en sistemas oleo-hidráulicos	1	\$ 1,454	\$ 4,800	\$ 6,254	\$ 10.254
SAF5	REEMPLAZO DE SENSORES	Reemplazo de sensores tipo transmisores de presión	1	\$ 400	\$ 160	\$ 560	\$ 1.380
<b>Total</b>				<b>\$ 9.904</b>	<b>\$ 38.320</b>	<b>\$ 49.704</b>	<b>\$ 68.600</b>

Tabla 30. Costos de la propuesta de mejora T2. (Creación propia).

Código	Nombre tarea	Tarea 2	Frecuencia Anual	Costos Insumos	Costos HH	Costos Tarea	Costos totales (T1+T2)
CAC1	CONTROL DE SEDIMENTOS EN AGUA	Apertura de compuertas en bocatoma Hornitos	176	\$ 1	\$ 40	\$ 7.216	\$ 44.216
CAC2	REEMPLAZO DE FILTROS	Reemplazo de filtros	8	\$ 240	\$ 80	\$ 2.560	\$ 3.700
CAC3	MANTENIMIENTO A VÁLVULAS	Reemplazo de sellos de válvulas Limpieza interna y externa.	2	\$ 390	\$ 160	\$ 1.100	\$ 4.060
FCO3	MEJORA A MICROFILTRADO	Micro filtrado de aceite	4	\$ 400	\$ 400	\$ 3.200	\$ 3.780
FCO6	CAPACITACIÓN Y SOLICITUD DE TRABAJADORES	Traslado de trabajadores	1	\$ 800	\$ 3,200	\$ 4.000	\$ 10.254
SAF5	REEMPLAZO DE SENSORES	Actualización de software.	0,5	\$ 800	\$ 20	\$ 820	\$ 1.380
<b>Total</b>				<b>\$ 2.631</b>	<b>\$ 3.900</b>	<b>\$ 18.896</b>	<b>\$ 68.600</b>

Los costos de la propuesta de mejora equivalen a US\$ 68.800, en donde las denominadas “Tarea 1” equivalen a US\$ 49.704 y las “Tarea 2” equivalen a US\$ 18.896, por lo que, comparar con los costos por falla anual con los costos de la propuesta estos equivalen a un 5,74%.

### 3.4. EVALUACIÓN DE COSTOS ACTUALES VS PROPUESTA.

Para evaluar económicamente la efectividad de la propuesta con relación al diagnóstico, parte de las actividades son planteadas según el modo de falla adecuado, existen actividades como Capacitación y Solicitud del personal que son tomadas en un ámbito general, ya que esta propuesta de solución busca englobar a todas las fallas pertenecientes al sistema oleo hidráulico, por lo que los costos relacionados a esta serán considerados al final de la evaluación (*Tabla 31*).

Tabla 31. Costos esperados con la propuesta

#	Componente	#	#	#	Modo de falla	Frecuencia esperada de eventos por año fallas/año	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo Futuro esperado \$/año
1	Planta de aceite	A	1	A	Filtros saturados	0.5	1	\$5,528	\$8,547	0	\$7,037
				B	Vibración	0.5	2.5	\$5,528	\$8,547	0	\$11,183
		B	1	A	Fuga externa - Medio de suministro	0.1	0.8	\$5,528	\$8,547	0	\$1,297
				A	Transferencia de calor insuficiente	0.25	0.5	\$5,528	\$8,547	0	\$2,828
2	Sistema de Nitrógeno	A	1	A	Fuga interna o externa - Medio de proceso (nitrógeno)	0.2	2	\$5,528	\$8,547		\$3,921
				B	Lectura errónea	1.0	1	\$5,528	\$8,547		\$14,075
3	Control de turbina	A	1	A	Fuga interna en servo válvulas	0.25	11.25	\$5,528	\$8,547	0	\$17,684
				B	Desgaste de componentes -Anillos -Toberas -Agujas	0.50	15	\$5,528	\$8,547	0.0	\$45,733
				A	Desgaste de los sellos por abrasión del agua para la generación.	0.2	6	\$5,528	\$8,547	0	\$8,343
4	Control válvula principal y by-pass	A	1	A	No funcionamiento de válvula secuencial	0.2	2.8	\$5,528	\$8,547	0	\$4,805
				A	Fuga interna en servo válvulas	0.2	2.8	\$5,528	\$8,547	0	\$4,805

Para resumir y comparar ambos escenarios (actual y futuro) se presentan de la siguiente tabla (Tabla 32):

Tabla 32. Comparación escenario actual vs escenario futuro. (creación propia)

SISTEMAS				ESCENARIO ACTUAL			ESCENARIO FUTURO					
#	Componente	#	#	Frecuencia de eventos promedio por año fallas/año	TPPR horas	Riesgo \$/año	Costos del plan Anual	Frecuencia esperada de eventos por año fallas/año	TPPR horas	Riesgo Futuro esperado \$/año	Ahorro potencial	
1	Planta de aceite	A	1	A	4,5	9	\$262.343	\$3.700	0,5	1	\$7.037	\$251.605
			B	0,5	2,5	\$11.183	\$0	0,5	2,5	\$11.183	\$0	
		B	2	A	0,75	6	\$31.286	\$4.060	0,1	0,8	\$1.297	\$25.929
			1	A	1	2	\$19.603	\$3.780	0,25	0,5	\$2.828	\$12.995
2	Sistema de Nitrógeno	A	1	A	1	10	\$63.826	\$1.320	0,2	2	\$3.921	\$58.586
			B	1	10	\$63.826	\$560	1	1	\$14.075	\$49.192	
3	Control de turbina	A	1	A	1	45	\$257.306	\$1.210	0,25	11,25	\$17.684	\$238.411
			B	1	30	\$174.386	\$44.216	0,50	15	\$45.733	\$84.437	
		2	A	1	30	\$174.386	\$4.060	0,2	6	\$8.343	\$161.983	
4	Control válvula principal y by-pass	A	1	A	1	14	\$85.938	\$1.210	0,2	2,8	\$4.805	\$79.923
			2	A	0,75	10,5	\$49.943	\$4.060	0,2	2,8	\$4.805	\$41.078
<b>TOTAL</b>						<b>\$1.194.026</b>	<b>\$68.176</b>			<b>\$121.711</b>	<b>\$1.004.139</b>	

Si bien, se visualiza un alto posible ahorro, esto es debido a que, al evaluar la propuesta en un escenario futuro, la frecuencia de fallas se ve reducida significativamente al igual que el tiempo promedio de reparación.

La capacitación de los trabajadores en conjunto con la solicitud y traslado de personal especialista desde otra central hidroeléctrica equivale a un total de US\$10.254 (US\$6.254 y US\$4.000 respectivamente) considerando la solicitud de personal para actividades planificadas de Mantenimiento Mayor. Por lo que, al incluir estos costos al escenario futuro, el ahorro potencial esperado será de US\$993.885.

## CONCLUSIÓN.

Debido a la escasez hídrica que afecta al país, la participación en la generación de energía eléctrica por parte de las centrales hidroeléctricas en el Sistema Eléctrico Nacional se ha visto disminuida, pese a esta situación, la disponibilidad y confiabilidad de una central hidroeléctrica es primordial para el Sistema Eléctrico Nacional.

La ruta para la transición energética ha sido definida, la economía debe migrar hacia las energías renovables para cumplir el objetivo de cero emisiones en el 2050. Esto implica esfuerzos tanto técnicos como económicos; técnicos al integrar nuevas tecnologías (eólicas, solar y BESS) a la matriz energética, con funcionalidades y equipos de última generación; económicos en la consecución de las inversiones necesarias para financiar la transición.

La tecnología hídrica tiene una madurez de más de un siglo. Las restricciones ambientales y sociales en la construcción de estos proyectos deben ser mitigadas con cumplimiento de altos estándares verificables por la comunidad y el Estado, otro medio pudiese ser la modernización y el aumento de la vida útil de la infraestructura existente. El desgaste natural no debe ser el principal análisis que se debe realizar para cuantificar la vida útil remanente, el análisis debe ser a partir de los datos existentes y de las restricciones tales como obsolescencia o agotamiento de repuestos, a su vez realizar predicciones de los comportamientos de los equipos.

Para el CEN Los índices relevantes equivalen a la disponibilidad y confiabilidad de la unidad generadora; según los datos obtenidos y con relación a las horas de funcionamiento, la confiabilidad mensual durante los 4 años de estudio ha permanecido por sobre 90%, esto se traduce en cifras positivas para el suministro energético; las fallas y detenciones obligadas por los antecedentes descritos al final de cada año se traducen en disminuciones de la confiabilidad ya que para la autoridad competente ve que el proceso de mantenimiento no es óptimo siendo que se posee tiempos prolongados de detenciones por Mantenimiento Mayor y a su vez por inspecciones durante el año.

Por lo que, las actividades de mantenimiento deben ser en búsqueda de una alta disponibilidad y confiabilidad de las centrales hidroeléctricas, puesto que los retos de la industria son disminuir la huella de carbono al mínimo; para esto la gestión de activos es un pilar clave para optimizar y adecuar los procesos de generación de energía eléctrica.

La empresa cuenta con un plan de gestión de activos, el cual consta de actividades a corto y largo plazo, lo que se está traduciendo en que hay estructuras tales como el estado de las instalaciones, sistemas o componentes, la disposición de los trabajadores y la veracidad de los datos de trabajo no son de una veracidad y calidad para sus análisis.

En una central hidroeléctrica todos los componentes son críticos al momento de poner en marcha y mantener su óptimo funcionamiento, no obstante, al momento de diagnosticar a la central Hornitos se logra determinar que dentro de los principales sistemas se obtiene el sistema oleo

hidráulico como el “más crítico” al momento de la operación, definición que por medio de matrices de criticidad evaluadas y determinadas por personal propio de operaciones y mantenimiento de la empresa, tomando criterios como impacto operacional, frecuencia de falla, flexibilidad operacional, costos de mantenimiento e impacto en seguridad, ambiente e higiene.

Posteriormente estudiando las fallas en los últimos 4 años se detecta que gran parte de las fallas son relacionadas a desgaste de componentes y saturación de filtros, los cuales fueron detectados en su mayoría en la operación de la unidad, provocando detenciones por fallas esto al no tener un análisis cuantitativo parte de personal de mantenimiento.

La propuesta busca mejorar ciertas actividades, instalaciones y componentes para reducir las paradas y avisos imprevistos, así como el desgaste prematuro de los componentes de la unidad generadora Hornitos; además, se propone capacitar al personal interno ligado al mantenimiento de las centrales puesto que contar con el grupo de mecánicos capacitados en equipos, sistemas y componentes oleo-hidráulicos permite optimizar la planificación de las actividades relacionadas a estos sistemas, por lo anterior es posible correlacionar la capacitación con los distintos equipos y sistemas a todo el personal de mantenimiento.

La programación de tareas de mantenimiento debe abarcar el máximo de actividades que durante el proceso de generación no son posibles de realizar, por lo tanto, toda actividad que sea predictiva, comisionamiento de equipos y correctivas que hayan entregado los análisis previos, deben ser realizadas en los Mantenimientos Mayores.

En términos económicos, los costos referenciados a indisponibilidad son los de mayor impacto en el desglose de los costes por falla, por lo que, si se invierte en mejora a los procesos de mantenimiento y capacitación del personal, el ahorro económico esperado puede equivaler a US\$993.885. Si bien es un valor atractivo, este puede tener variaciones que impliquen aumento o disminución en los costes de la mano de obra, costes de las actividades como tal, variación en la frecuencia de realización de los eventos, así como también en los costes por indisponibilidad, los cuales dependen principalmente del costo de la energía en el momento.

Parte de las unidades generadoras pertenecientes al complejo Hidroeléctrico Aconcagua cuentan con similares características en diseño a la central Hornitos, como lo son la Unidad Juncal, Unidad Blanco y Unidad N°3 de Los Quilos, las cuales son unidades de Turbina Pelton de eje vertical con un distribuidor de 6 inyectores. La similitud en su diseño permite optimizar los planes de mantenimiento de manera similar a la propuesta de mejora, principalmente en las actividades de reacondicionamiento de válvulas, mejoramiento del control de los filtros del gobernador, micro filtrado y análisis del aceite, buscando cumplir con las altas disponibilidad en la operación.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Energía. M, S. E. Y. C. (2020). *Resolución 31876 EXENTA ESTABLECE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE INTEGRIDAD DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS, MEDIANTE PLIEGO TÉCNICO NORMATIVO - RPTD N° 17.*
- Energía. M. (2016). *Ley 20936 ESTABLECE UN NUEVO SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA Y CREA UN ORGANISMO COORDINADOR INDEPENDIENTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL.*
- Energía. M. (2013). *Ley 20257. Ley General de Servicios Eléctricos.*
- Comisión Nacional de Energía. (2024). *INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO.* <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/06/ICTG-Mayo-2024.pdf>
- Comisión Nacional de Energía. (2024). *PRECIO MEDIO DE MERCADO SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (PMM SEN).* [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/12/Precio\\_Medio\\_de\\_Mercado-12\\_24.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/12/Precio_Medio_de_Mercado-12_24.pdf)
- Combustibles. S. E. (2017). *Resolución Exenta N° 17951, REGULA EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LAS INSTALACIONES DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS CONECTADAS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN.*
- Energía. M. (2020). Decreto 88. APRUEBA REGLAMENTO PARA MEDIOS DE GENERACIÓN DE PEQUEÑA ESCALA.
- Carlos Alberto Parra Márquez Adolfo Crespo Márquez. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. Segunda Edición.*
- Colbún. (2024). Colbun-PROD. <https://www.colbun.cl/home>
- REPORTE DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (ART 72°-15, LEY 20.936) | 2024
- *Memorias anuales.* (2024). Colbun-PROD. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de <https://www.colbun.cl/corporativo/sala-de-prensa/memorias-anuales>
- International Organization for Standardization. (2016). *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016).*

- Internacional Organization for Standardization. (2021). *ISO 4406:2021 (en) Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.*
- Society of Automotive Engineers. (1999). *Norma SAE JA1011 – Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).*
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos. Sexta edición.*
- Departamento Operaciones, C. C. A. (2015). *Manual de Operaciones Central Hornitos.*

## ANEXO.

### A. TIPOS DE TURBINAS UTILIZADAS EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO.

1. Turbina Francis: Desarrollada en 1848 por el ingeniero angloamericano James B. Francis y es el tipo de turbina hidráulica más utilizado. Es una turbina de flujo centrípeto en la que el agua llega al rotor a través de un conducto en espiral; después, un rodillo en la parte fija dirige el caudal para invertir las palas del rotor. Se utiliza para saltos de altura media (de 10 a 300/400 [m]) y caudales de agua de 2 a 100 [m<sup>3</sup>/s].
2. Turbina Pelton: Fue introducida en 1879 por el carpintero e inventor americano Lester Allan Pelton. Su principio de funcionamiento refleja el de la clásica noria con paletas de los antiguos molinos de agua, reelaborada para aumentar su eficiencia: el agua se transporta a la tubería forzada, que cuenta con una boquilla o inyector en el extremo, una obturación que aumenta la velocidad del agua. El chorro de agua que sale de la boquilla golpea las palas del rotor, que tienen forma de cuchara. La turbina Pelton se utiliza para grandes saltos de agua (entre 300 y 1400 [m]) y caudales de menos de 50 [m<sup>3</sup>/s], con el fin de obtener mayores velocidades.
3. Turbina Kaplan: Creada en 1913 por el profesor austriaco Viktor Kaplan, sigue el principio de las hélices de un barco. La turbina Kaplan es una turbina de tipo axial en la que el caudal de agua hace que los álabes de la hélice giren hacia adentro y hacia afuera en dirección axial con respecto al eje de rotación de la hélice. Gracias a la posibilidad de ajustar el ángulo de incidencia de las palas, tiene la ventaja de proporcionar un excelente rendimiento con bajos saltos de agua, pero también con grandes variaciones en el caudal (desde 200 [m<sup>3</sup>/s]).

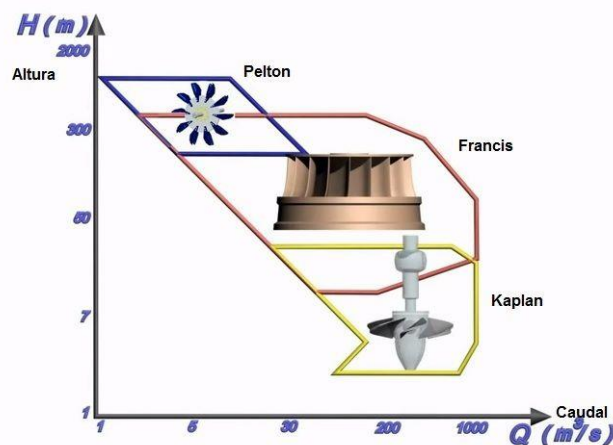


Ilustración 14. Turbinas hidráulicas más comunes (altura "H" vs caudal "Q")

## **B. VALORES.**

- 1. LIDERAMOS RESPONSABLEMENTE**, tenemos un rol en la sociedad: Creemos en una transición energética responsable en la que somos un actor relevante. Desarrollamos proyectos que aportan a un mejor futuro.

Construimos un negocio de largo plazo y sostenible, que se mantiene vigente y adaptándose a las cambiantes necesidades de la sociedad.

Aspiramos a hacer lo correcto, actuando de manera íntegra y siendo conscientes de nuestro aporte en los lugares donde operamos.

- 2. NOS IMPORTAN LAS PERSONAS** ¡Nos importas tú!: Promovemos el respeto por las personas, la colaboración y el trabajo en equipo para lograr las metas de la compañía.

Buscamos desarrollarnos en un espacio donde todos sintamos que podemos entregar lo mejor de nosotros mismos.

Queremos ser una empresa atractiva e inspiradora para el talento, donde las personas puedan alcanzar sus sueños.

Creemos que la dignidad y la seguridad de las personas están por sobre cualquier meta.

- 3. TENEMOS UN PROPÓSITO INTEGRADOR**: Buscamos conocer a nuestros clientes y sus necesidades, haciéndonos parte de sus retos y metas, para que puedan alcanzar sus objetivos.

En el corazón de Colbún siempre están presentes en las necesidades y desafíos de nuestras comunidades; las conocemos de cerca, nos involucramos de manera temprana y lo hacemos con un sentido de largo plazo.

Integramos en nuestro propósito a diversos grupos de interés, generando oportunidades para su desarrollo.

- 4. QUEREMOS DEJAR UNA HUELLA POSITIVA**: Buscamos que el desarrollo de nuestra empresa sea en equilibrio con el planeta. Nos desafiamos a contribuir a la mitigación y adaptación al cambio climático.

Cuidamos la biodiversidad, promovemos un uso responsable de los recursos naturales y fomentamos la economía circular.

- 5. ACTUAMOS CON COHERENCIA**, somos personas de palabra: Buscamos ser congruentes entre lo que pensamos, lo que decimos y lo que hacemos.

Trabajamos con la convicción de que el horizonte de relaciones que creamos es siempre a largo plazo.

Creemos que la confianza se construye en base a la transparencia y honestidad en nuestras relaciones.

Reconocemos con humildad en aprender de ellos para enmendarlos.

- 6. TRABAJAMOS CON PASIÓN**, le ponemos toda la energía: Buscamos la excelencia y siempre estamos dispuestos a hacer un esfuerzo adicional.



#### **D. CONFIGURACIÓN COMPLEJO ACONCAGUA.**

La configuración del complejo Aconcagua abarca desde la curva cero de Caracoles en el camino internacional Los Andes Mendoza en el sector oriente de la ciudad de Los Andes, en ese punto se captan las aguas del Río Juncal y Juncalillo, ambos caudales son ingresados en las instalaciones llamadas Bocatoma Hornitos, el agua es desarenada y limpiada mediante rejas de contención y lamelas sedimentadores, el agua ingresa a un embalse de regulación de capacidad de 265.000 [m<sup>3</sup>]. Continuando con cauce del agua, esta es guiada por la cordillera en canales y túneles abovedados, el caudal máximo admisible es de 12 [m<sup>3</sup>/s] toda esta agua circula a una cámara de carga lugar donde el agua se guía por una tubería de presión hasta la Casa de máquinas que está bajo a una distancia de 550 [m]. Esta central denominada Hornitos, posee una turbina de tipo Pelton, el agua proveniente de la cámara de carga Hornitos es turbinada y su energía cinética es transformada en energía mecánica, la cual producto del giro del eje de acoplamiento se produce energía eléctrica en la parte superior donde se encuentran los bobinados, generando 55 [MW] de potencia eléctrica nominal. El agua pierde fuerza y se descarga a un canal que alimenta una Mini hidroeléctrica llamada Central Juncalito de capacidad de 1,5 [MW] de potencia instalada. Esta unidad está compuesta por una turbina de tipo Kaplan, para la operación se posee una altura de caída de 25 [m] del agua.

La Unidad Juncal otra unidad de tipo Pelton de capacidad de 29.2 [MW] utiliza el agua del río Juncal captada en Bocatoma Juncal en donde se limpia y desarena, luego se deriva a un embalse de regulación, en la salida de esta instalación hidráulica el agua se une a la turbinada por la Unidad Juncalito, el agua es guiada por túneles y canales hasta la cámara de carga, la altura de caída es de 255 [m]. El caudal de agua de 13,2 [m<sup>3</sup>/s] se guía por una tubería de presión para ser turbinada por la unidad Juncal, el agua sin energía cinética es derivada en su descarga hacia un canal colector con entrega a la bocatoma Aconcagua

La Unidad Blanco unidad de turbina tipo Pelton de capacidad de 56 [MW], capta su caudal de 10 [m<sup>3</sup>/s] en el Río Blanco, mediante la Bocatoma Blanco en donde se limpia y desarena el agua, esa es derivada por túnel y canal hasta la cámara de carga, en esta instalación el agua se encausa en una tubería de presión que posee una altura de caída de 655 [m]. El agua es turbinada por la Unidad Blanco, ya sin energía el agua se encausa hacia un canal colector con entrega a la bocatoma Aconcagua.

Las unidades de la Central Los Quilos son de tipo Pelton de capacidad de 13,5 [MW], dos unidades con eje horizontal y una con eje vertical; sus afluentes son desde el río Colorado y Aconcagua en ambas obras hidráulicas (bocatomas), el agua es limpiada y desarenada, luego es encausada por canales abovedados los cuales convergen en una Cámara de carga, donde nacen tres tuberías una para cada unidad generadora con una altura de caída de 350 [m]. El agua turbinada es guiada por un canal abierto hasta la cámara de carga Chacabuquito, en donde por una tubería de



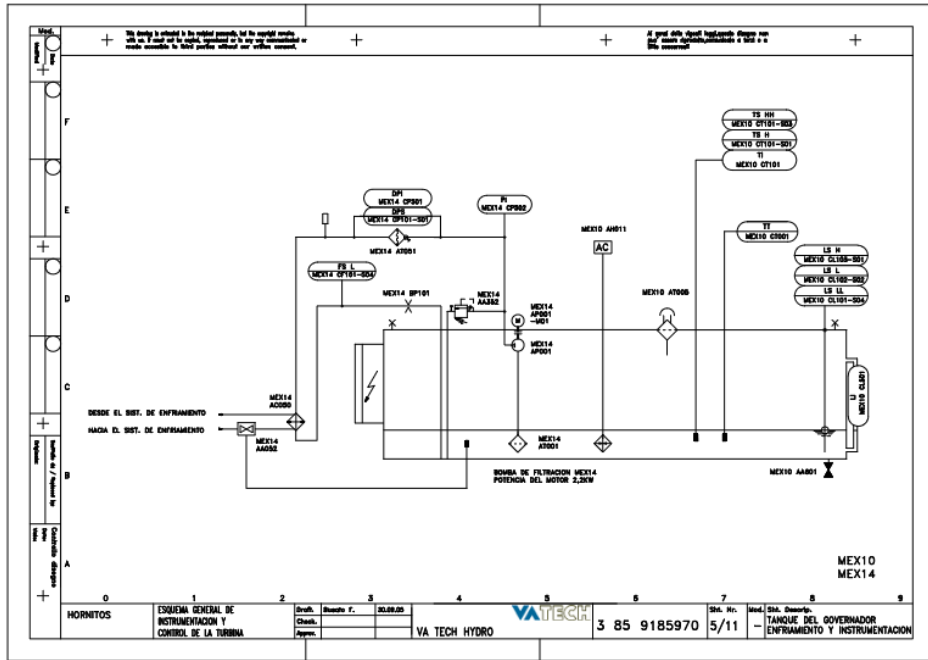


Ilustración 17. Plano de circuito de recirculación de aceite. Creado por VATECH.

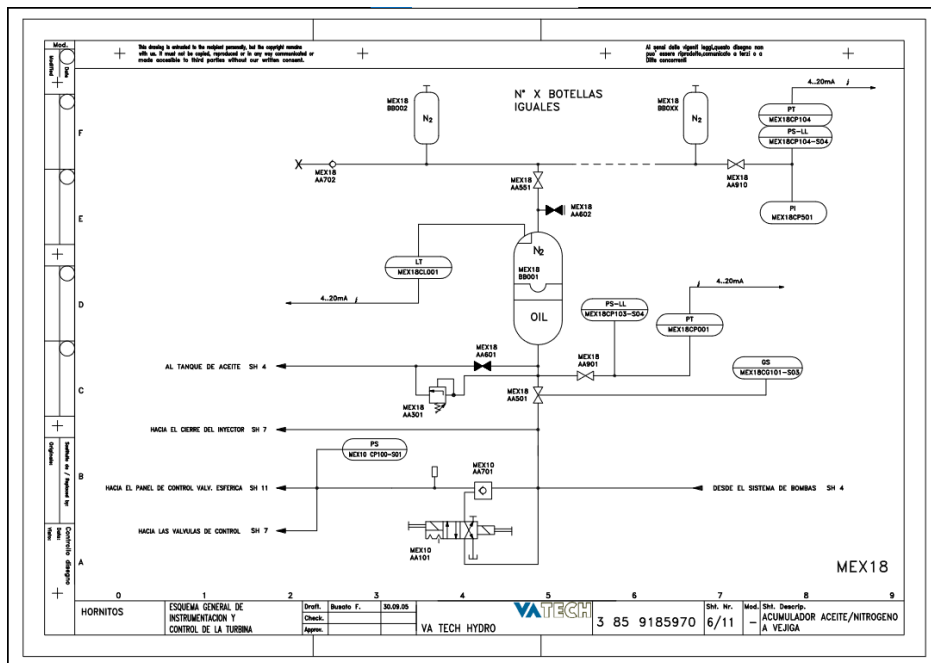


Ilustración 18. Plano sistema de nitrógeno. Creado por VATECH.

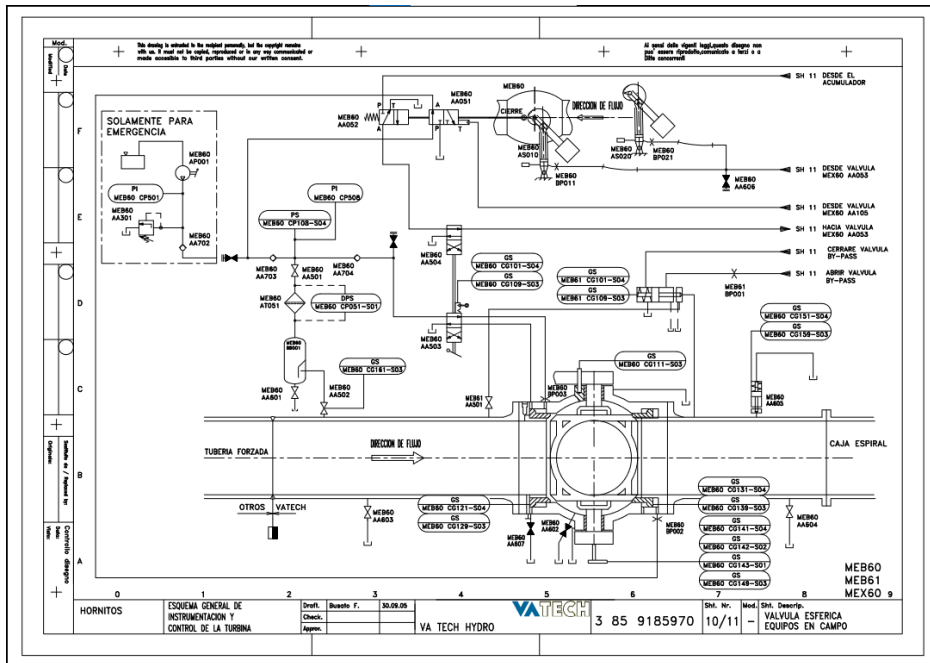


Ilustración 19. Parte 1 Plano sistema Control de válvula principal y by-pass. Creado por VATECH.

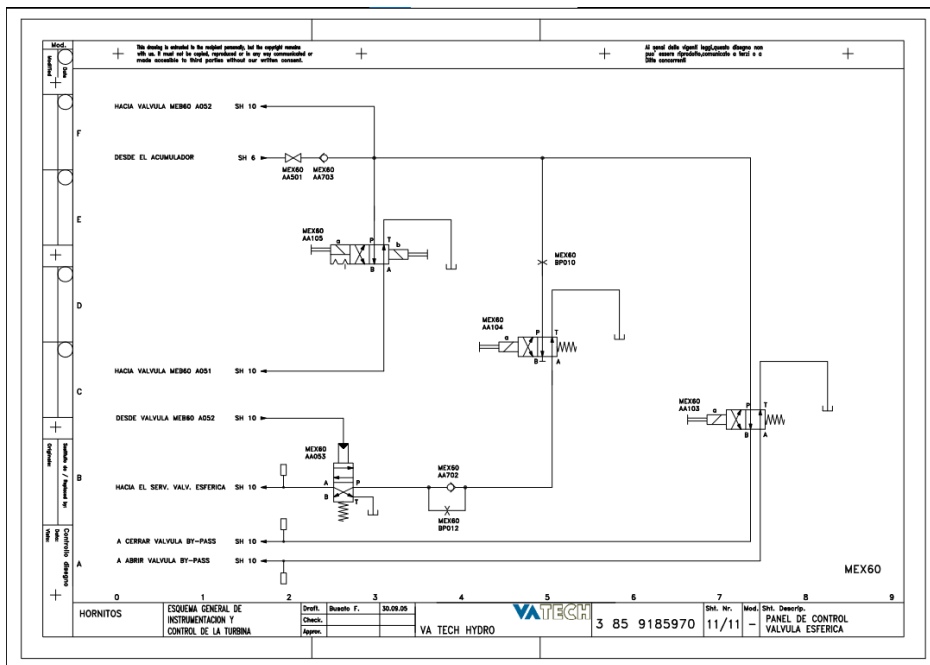


Ilustración 20. Parte 2 Plano sistema Control de válvula principal y by-pass. Creado por VATECH

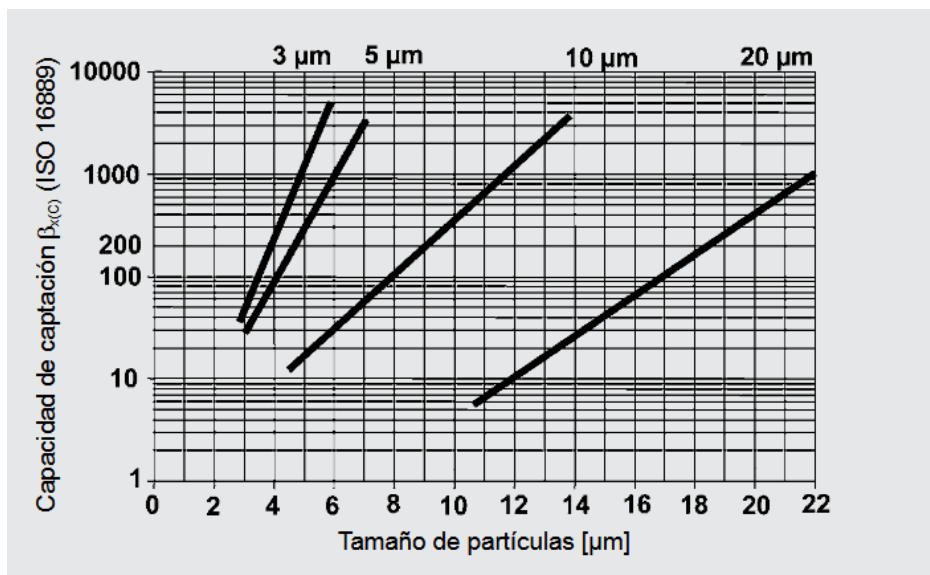


Diagrama 9. Capacidad de filtración de cada filtro según tamaño. (Creado por HYDAC).

**F. HORAS DE SERVICIO, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNIDAD  
HORNITOS.**

Tabla 33. Horas de servicio Central Hornitos 2020.

MES	HORAS DE SERVICIO CENTRAL HORNITOS 2020							
	HORNITOS HRS SERV.	HORNITOS HRS DISP.	HORNITOS HRS DESC. PRG	HORNITOS HRS FALLA INT	HORNITOS HRS FALLA EXT	[Hrs] Total	CONF.	DISP.
ENERO	719:38	7:58	10:50	5:34	0:00	744:00:00	99.25	97.77%
FEBRERO	689:20	0:00	5:42	0:00	0:58	696:00:00	100.00	99.04%
MARZO	588:47	0:00	155:13	0:00	0:00	744:00:00	100.00	79.14%
ABRIL	721:00	0:00	0:00	0:00	0:00	721:00:00	100.00	100.00%
MAYO	288:03	0:00	455:57	0:00	0:00	744:00:00	100.00	38.72%
JUNIO	0:00	0:00	720:00	0:00	0:00	720:00:00	100.00	0.00%
JULIO	437:44	0:00	306:16	0:00	0:00	744:00:00	100.00	58.84%
AGOSTO	719:09	0:00	0:00	0:51	0:00	720:00:00	99.88	99.88%
SEPTIEMBR	721:00	0:00	0:00	0:00	0:00	721:00:00	100.00	100.00%
OCTUBRE	0:00	0:00	744:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	0.00%
NOVIEMBRE	721:00	0:00	0:00	0:00	0:00	721:00:00	100.00	100.00%
DICIEMBRE	692:03	0:00	0:00	51:57	0:00	744:00:00	93.02	93.02%
TOTALES	6297:44:00	7:58:00	2397:58:00	58:22:00	0:58:00	8763:00:00	99.89	71.93%

Tabla 34. Horas de servicio Central Hornitos 2021.

MES	HORAS DE SERVICIO CENTRAL HORNITOS 2021							
	HORNITOS HRS SERVICIO.	HORNITOS HRS DISPONIBLE	HORNITOS HRS DESCONEJÓN PROGRAMADA.	HORNITOS HRS FALLA INTERNA	HORNITOS HRS FALLA EXTERNA	[Hrs] Total	CONFIABILIDAD	DISPONIBILIDAD
ENERO	702:07	0:00	0:00	8:32	33:21	744:00:00	98.85	94.37
FEBRERO	644:43	0:00	0:00	0:00	27:17	672:00:00	100.00	95.94
MARZO	711:35	0:00	32:25	0:00	0:00	744:00:00	100.00	95.64
ABRIL	665:35	0:00	52:52	0:46	1:47	721:00:00	99.89	92.31
MAYO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
JUNIO	718:12	0:00	0:00	0:00	1:48	720:00:00	100.00	99.75
JULIO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
AGOSTO	698:33	0:00	0:00	45:27	0:00	744:00:00	93.89	93.89
SEPTIEMBR	454:04	0:00	259:29	0:00	5:27	719:00:00	100.00	63.15
OCTUBRE	579:51	0:00	163:17	0:00	0:52	744:00:00	100.00	77.94
NOVIEMBRE	712:20	7:40	0:00	0:00	0:00	720:00:00	100.00	100.00
DICIEMBRE	679:42	64:18	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
TOTALES	8054:42:00	71:58:00	508:03:00	54:45:00	70:32:00	8760:00:00	99.38	92.77

Tabla 35. Horas de servicio Central Hornitos 2022.

MES	HORAS DE SERVICIO CENTRAL HORNITOS 2022							
	HORNITOS HRS SERVICIO.	HORNITOS HRS DISPONIBLE	HORNITOS HRS DESCONEXIÓN PROGRAMADA.	HORNITOS HRS FALLA INTERNA	HORNITOS HRS FALLA EXTERNA	[Hrs] Total	CONFIABILIDAD	DISPONIBILIDAD
ENERO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
FEBRERO	672:00	0:00	0:00	0:00	0:00	672:00:00	100.00	100.00
MARZO	732:25	0:00	11:35	0:00	0:00	744:00:00	100.00	98.44
ABRIL	707:50	0:00	0:00	13:10	0:00	721:00:00	98.17	98.17
MAYO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
JUNIO	720:00	0:00	0:00	0:00	0:00	720:00:00	100.00	100.00
JULIO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
AGOSTO	736:35	0:00	7:25	0:00	0:00	744:00:00	100.00	99.00
SEPTIEMBR	263:07	0:00	455:53	0:00	0:00	719:00:00	100.00	36.59
OCTUBRE	419:02	21:07	303:51	0:00	0:00	744:00:00	100.00	59.16
NOVIEMBRE	701:30	4:21	13:36	0:33	0:00	720:00:00	99.92	98.03
DICIEMBRE	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
TOTALES	7928:29:00	25:28:00	792:20:00	13:43:00	0:00:00	8760:00:00	99.84	90.80

Tabla 36. Horas de servicio Central Hornitos 2023.

MES	HORAS DE SERVICIO CENTRAL HORNITOS 2023							
	HORNITOS HRS SERVICIO.	HORNITOS HRS DISPONIBLE	HORNITOS HRS DESCONEXIÓN PROGRAMADA.	HORNITOS HRS FALLA INTERNA	HORNITOS HRS FALLA EXTERNA	[Hrs] Total	CONFIABILIDAD	DISPONIBILIDAD
ENERO	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
FEBRERO	672:00	0:00	0:00	0:00	0:00	672:00:00	100.00	100.00
MARZO	681:21	0:00	10:04	1:31	51:04	744:00:00	99.80	91.58
ABRIL	720:00	0:00	0:00	0:00	0:00	720:00:00	100.00	100.00
MAYO	710:23	0:00	12:09	21:28	0:00	744:00:00	97.11	95.48
JUNIO	720:00	0:00	0:00	0:00	0:00	720:00:00	100.00	100.00
JULIO	738:29	0:00	2:46	0:00	2:45	744:00:00	100.00	99.26
AGOSTO	517:06	146:59	79:55	0:00	0:00	744:00:00	100.00	89.26
SEPTIEMBR	537:41	0:00	182:19	0:00	0:00	720:00:00	100.00	74.68
OCTUBRE	744:00	0:00	0:00	0:00	0:00	744:00:00	100.00	100.00
NOVIEMBRE	678:54	0:00	41:06	0:00	0:00	720:00:00	100.00	94.29
DICIEMBRE	631:18	0:00	112:42	0:00	0:00	744:00:00	100.00	84.85
TOTALES	8095:12:00	146:59:00	441:01:00	22:59:00	53:49:00	8760:00:00	99.74	94.09

## G. CRITICIDAD DE LOS SISTEMAS.

Tabla 37. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Generación.

SISTEMA DE GENERACIÓN			Análisis de criticidad	
<b>Frecuencia de Falla (FF)</b>	<b>Fallas por año</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Equipo a evaluar:</b>	<b>Puntuación</b>
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	2
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	10
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	4
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	1
			<b>Total</b>	<b>43</b>
<b>Impacto Operacional (IO)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Factor de consecuencias:</b>	
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
<b>Flexibilidad Operacional (FO)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
<b>Costo de Mantenimiento (CM)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
<b>Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Tabla 38. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Distribución de aguas.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS			Análisis de criticidad	
<b>Frecuencia de Falla (FF)</b>	<b>Fallas por año</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Equipo a evaluar:</b>	<b>Puntuación</b>
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	3
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	8
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	2
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	1
			<b>Total</b>	<b>19</b>
<b>Impacto Operacional (IO)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
<b>Flexibilidad Operacional (FO)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
<b>Costo de Mantenimiento (CM)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
<b>Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Ponderación</b>		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Tabla 39. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Refrigeración.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			Análisis de criticidad	
Frecuencia de Falla (FF)	Fallas por año	Ponderación	Equipo a evaluar:	Puntuación
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	3
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	10
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	2
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	3
			<b>Total</b>	<b>25</b>
Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencias	Ponderación		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
Costo de Mantenimiento (CM)	Consecuencias	Ponderación		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Tabla 40. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Control.

SISTEMA DE CONTROL			Análisis de criticidad	
Frecuencia de Falla (FF)	Fallas por año	Ponderación	Equipo a evaluar:	Puntuación
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	3
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	5
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	4
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	1
			<b>Total</b>	<b>23</b>
Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencias	Ponderación		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
Costo de Mantenimiento (CM)	Consecuencias	Ponderación		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Tabla 41. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema Neumático.

SISTEMA NEUMATICO			Análisis de criticidad	
Frecuencia de Falla (FF)	Fallas por año	Ponderación	Equipo a evaluar:	Puntuación
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	1
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	1
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	2
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	1
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	1
			<b>Total</b>	<b>4</b>
Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencias	Ponderación		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
Costo de Mantenimiento (CM)	Consecuencias	Ponderación		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

Tabla 42. Cuadro para determinar la consecuencia y frecuencia de fallas de sistema de Lubricación.

SISTEMA DE LUBRICACIÓN			Análisis de criticidad	
Frecuencia de Falla (FF)	Fallas por año	Ponderación	Equipo a evaluar:	Puntuación
Pobre	Más de 8	4	Frecuencia de Falla	1
Promedio	Enter 5 y 7	3	Impacto Operacional	10
Buena	Entre 2 y 4	2	Flexibilidad Operacional	4
Excelente	Menor o igual a 1	1	Costos de Mantenimiento	2
			Impacto en Seguridad, Ambiente, Higiene	6
			<b>Total</b>	<b>48</b>
Impacto Operacional (IO)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Para inmediata de toda la generación	10		
Alto	Afecta sobre un 60% a la generación	8		
Promedio	Afecta entre un 30% y un 60% a la	5		
Bajo	Afecta menos del 30% a la generación	3		
Sin Impacto	No afecta a la generación	1		
Flexibilidad Operacional (FO)	Consecuencias	Ponderación		
Alta	No se dispone de otros equipos igual o	4		
Promedio	El sistema puede seguir funcionando	2		
Baja	Se dispone de otro equipo igual o similar	1		
Costo de Mantenimiento (CM)	Consecuencias	Ponderación		
Alto	Más de \$2.000	2		
Bajo	Menos de \$2.000	1		
Impacto en seguridad, ambiente, higiene (ISAH)	Consecuencias	Ponderación		
Extremadamente Alto	Afecta seguridad humana	8		
Alto	Afecta al medio ambiente produciendo	6		
Promedio	Afecta instalaciones causando daños	4		
Bajo	Provoca daños menores - accidentes e	2		
Sin Impacto	Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1		

**H. TABLA DE FALLAS.**

Tabla 43. Resumen de fallas (creación propia).

<b>MODOS DE FALLAS Y SUBSISTEMAS</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>Total</b>
<b>Alta presión</b>			<b>1</b>		<b>1</b>
Sistema de Nitrógeno			1		1
<b>Alta temperatura</b>	<b>2</b>	<b>1</b>			<b>3</b>
Planta de aceite	2	1			3
<b>Alta temperatura del aceite</b>		<b>1</b>			<b>1</b>
Planta de aceite		1			1
<b>Bajo nivel</b>		<b>2</b>			<b>2</b>
Descanso de turbina		2			2
<b>Contaminación</b>	<b>1</b>				<b>1</b>
Planta de aceite	1				1
<b>Desgaste</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>28</b>
Control de turbina	5	1	3	3	12
Control de Válvula principal y by-pass	1	2	1	3	7
Planta de aceite	4			2	6
Sistema de Nitrógeno	1	1	1		3
<b>Error en lectura</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
Sistema de Nitrógeno	1	1	1	1	4
<b>Filtro saturado</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>18</b>
Planta de aceite	4	3	3	8	18
<b>Perdida comunicaciones Central Hornitos</b>	<b>1</b>				<b>1</b>
Módulos comunicación	1				1
<b>Vibraciones</b>	<b>1</b>	<b>1</b>			<b>2</b>
Planta de aceite	1	1			2
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>17</b>	<b>61</b>



*Un mundo se extiende frente a tus ojos solo para ti que buscas ser libre;  
Y si tus sueños infinitos son los que guían tu destino  
¡Ve más allá de ellos agitando la bandera de tus convicciones!*

*One Piece.*