



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO Y MEJORA EN EL SISTEMA DE
EXTRACCIÓN DE AIRE DEL CONDENSADOR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

BENJAMÍN MAURICIO FUENTES CARVAJAL

PROFESOR GUÍA:
WALDO GUERRERO FUENTES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
BENJAMIN HERRMANN PRIESNITZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Generadora Metropolitana

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: BENJAMÍN MAURICIO FUENTES CARVAJAL
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: WALDO GUERRERO FUENTES

ESTUDIO Y MEJORA EN EL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE AIRE DEL CONDENSADOR

La central Nueva Renca es una central productora de energía eléctrica, puesta en servicio en 1997, la cual trabaja con un ciclo combinado de 379 MW de potencia instalada, y utiliza gas natural o diésel como combustibles. Dentro del ciclo de vapor, específicamente a la salida de la turbina, se encuentra el condensador, que tiene como objetivo condensar el vapor de agua que ya realizó trabajo mecánico en la turbina. Para lograr una correcta condensación, se requiere que dentro del condensador se trabaje idealmente solo con vapor de agua. Sin embargo, existen infiltraciones en diferentes sectores que causan que al interior del condensador estén presentes gases no condensables, como el aire. Por lo anterior, se utiliza un sistema de extracción de gases, que tiene como principal equipo la bomba de vacío Nash, la cual corresponde a una bomba de vacío de anillo líquido. El equipo trabaja generando vacío con dos etapas, con el fin de mover el flujo no condensable. Además de la bomba, el sistema cuenta con diferentes componentes que permiten la extracción de gases del condensador.

Las condiciones de diseño de la planta indican que el condensador debe operar con una única bomba de vacío, y se deben instalar dos, con el fin de contar con un respaldo para el sistema, y facilitar las mantenciones. Sin embargo, actualmente, la planta funciona con las dos bombas de vacío activas.

El objetivo general es mejorar el sistema de extracción de aire, evaluando el problema de pérdida de vacío, lo que causa que el condensador sea incapaz de operar con una única bomba de vacío, tal como su condición de diseño indica.

Los resultados obtenidos permiten estructurar la información que se tenía del sistema, mediante la creación de planos y la codificación de los componentes. Mediante la investigación de documentos y la experiencia de los trabajadores, se logra comprender correctamente el sistema. Se concluye que el problema principal son las altas infiltraciones en el condensador, lo que causa que deban extraerse más gases no condensables de este mismo. Por ello, se requiere identificar las infiltraciones y solucionarlas. También se encuentran posibles mejoras en el sistema de control del sistema, que permitirían tener una mejor supervisión desde sala de control, y con ello, una mayor confianza en el sistema.

Para S. A. y R.

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a Dios por permitirme avanzar en mi camino de la vida y lograr lo que he logrado.

A mis padres, quienes siempre estuvieron para apoyarme y dar lo mejor de si mismos para para mi bienestar, y permitirme disfrutar de la vida.

A mi hermano menor, y a mis dos hermanas menores, por quienes trabajo para ser su ejemplo, y me brindan inspiración para superarme y ser una mejor persona.

A mis profesores en mis distintos colegios, que se esforzaron muchas veces más allá de su profesión para impulsarme a soñar.

A mis amigos del colegio, que siempre han estado para apoyarme cuando los he necesitado, y a mis amigos de la universidad, que me permitieron amar esta etapa universitaria, que repetiría sin dudarlo.

A mi novia, que ha estado conmigo durante casi todo mi periodo universitario, que me ha permitido crecer y madurar como persona, y que me ha apoyado siempre.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción general	1
1.2. Objetivos y Alcances	1
1.2.1. Objetivo general	1
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Ciclo de la central	3
2.2. Vacío en la operación del condensador	3
2.3. Condensador principal	6
2.4. Sistema de extracción de aire	8
2.5. Bomba de extracción gases no condensables	10
2.5.1. Funcionamiento de la bomba	10
2.5.2. Agua de sellado	13
2.5.3. Características de la bomba conforme el manual	14
2.5.4. Características de la bomba en operación	15
3. Memoria de cálculo	17
3.1. Intercambiadores de calor	17
3.2. Condensador	19
3.2.1. Presiones totales y parciales	20
4. Metodología	22
5. Desarrollo	24
5.1. Problema inicial	24
5.2. Reconocimiento del sistema	25
5.3. Fugas en la bomba	25
5.4. Conexión entre etapas de la bomba	26
5.5. P&ID	28
5.6. Creación KKS	32
5.7. Enfoque de las mejoras	32
5.8. Rendimiento condensador	34
5.9. Infiltraciones condensador	37
5.9.1. Solución a las infiltraciones	40
5.10. Mejora en cañerías LV007 y LV009	41
5.11. Control de la bomba	44

5.11.1. Flujómetros	46
5.11.2. Interruptores de presión	49
5.11.3. Válvula solenoide para la reposición de agua	49
6. Conclusiones	55
Bibliografía	58

Índice de Tablas

2.1.	Condiciones y calidad de agua para la generación del anillo líquido según estándar NASH [5]	14
5.1.	Simbología P&ID	30
5.2.	Caudal volumétrico de infiltraciones en el condensador	39
5.3.	Tuberías a comprar	43
5.4.	Bridas a comprar	43
5.5.	Codos a comprar	43
5.6.	Tee a comprar	43
5.7.	Socket a comprar	43
5.8.	Coplas a comprar	44

Índice de Ilustraciones

2.1.	Variación de parámetros en agua saturada	4
2.2.	Presión operativa turbina de vapor baja presión [3]	5
2.3.	Diagrama condensador principal [4]	7
2.4.	Diagrama P&ID sistema extracción de aire	9
2.5.	Componentes principales bomba [5]	11
2.6.	Esquema rotor bomba [6]	11
2.7.	Principios de funcionamiento [6]	12
2.8.	Operación de la bomba en bajo y alto vacío [5]	13
2.9.	Curva de rendimiento de la bomba a 880 RPM [5]	14
2.10.	Curvas de rendimiento mecánico 2014 [7]	15
2.11.	Curvas de rendimiento mecánico 2022 [8]	16
3.1.	Intercambiador de calor de doble tubo a contraflujo [9]	17
5.1.	Bomba en terreno	25
5.2.	Tapón segunda etapa	26
5.3.	Conexión entre etapas	27
5.4.	Cáncamo en la ranura del tapón [5]	28
5.5.	P&ID nuevo versión A	29
5.6.	P&ID nuevo versión 1	31
5.7.	Comparación variables condensador	36
5.8.	Comparación de variables con la eficiencia del condensador	37
5.9.	Resultados prueba de vacío en condensador	38
5.10.	ADIXEN ASM 310 [13]	40
5.11.	Diagrama proceso de detección de fugas [13]	40
5.12.	Prueba identificación de material	42
5.13.	Planos isométricos	42
5.14.	Conexión entre etapas	45
5.15.	Interfaz de control sistema de extracción de aire	45
5.16.	Flujómetros en terreno	47
5.17.	Andamios para flujómetros	47
5.18.	Equipo de medición de caudal con ultrasonido	48
5.19.	Ubicación nueva para la medición de caudal	49
5.20.	Válvulas solenoides para la reposición de agua	50
5.21.	Interruptor de nivel	51
5.22.	Extracción válvula solenoide	52
5.23.	Válvulas solenoide	52
5.24.	Conexión actuador y fuente regulada	53
5.25.	Válvula solenoide destapada	53
5.26.	Válvula solenoide desarmada	54

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción general

Para cualquier proceso en el que se involucren un conjunto de equipos, siempre se espera que cada uno se desempeñe de la mejor manera posible, para lograr un mejor rendimiento del conjunto. Particularmente en la generación de energía eléctrica se construyen plantas, donde se deben seleccionar diferentes equipos conforme a la producción buscada, y se espera que cada equipo cumpla con entregar su mejor eficiencia.

La central Nueva Renca es una central productora de energía eléctrica. la cual trabaja con un ciclo combinado de 379 MW de potencia instalada, y utiliza gas natural o diésel como combustibles [1]. Fue puesta en servicio en el año 1997, y se ubica en Renca, en la región metropolitana, Chile. Es una planta termoeléctrica de ciclo combinado que opera con dos turbinas, una a gas, y una a vapor. Dentro del ciclo del vapor, se utiliza el condensador principal para condensar el vapor de agua proveniente de la turbina de vapor de baja presión. Para que el condensador se desempeñe correctamente, se utiliza un sistema de extracción para capturar los gases no condensables, como puede ser aire u otros, y así, no afecten negativamente a la condensación. El sistema de extracción de gases no condensables cuenta con un equipo principal, el cual es la bomba de vacío Nash, la que corresponde a una bomba de vacío de anillo líquido. El equipo trabaja generando vacío con dos etapas, con el fin de extraer los gases no condensables del condensador. El sistema de extracción de aire será estudiado con el fin de mejorar su funcionamiento, y evaluar su impacto en el ciclo de la planta.

El estudio es motivado primeramente por el enorme potencial de aprender de la industria de la generación de energía eléctrica. Se considera además que el trabajo a realizar puede tener un impacto positivo para la central Nueva Renca.

1.2. Objetivos y Alcances

1.2.1. Objetivo general

Mejorar el sistema de extracción de aire y analizar el problema de pérdida de vacío en el ciclo de potencia de la central Nueva Renca.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Reconocer los componentes del sistema de extracción de aire, incluyendo instrumentos de medición.
2. Analizar el problema de pérdida de vacío en el condensador, y evaluar el impacto del cambio de parámetros del sistema sobre los equipos del ciclo combinado.
3. Analizar mejoras en el sistema de control del sistema de extracción de aire.
4. Revisar el correcto funcionamiento de los componentes del sistema.

1.3. Alcances

El estudio de los componentes de la bomba está sujeto al personal de la central Nueva Renca, donde se decidirán los niveles de inspección en la bomba. La variación de parámetros debe ser realizada con cuidado de no cambiar los parámetros del ciclo de potencia de manera dañina para los demás equipos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Ciclo de la central

La central Nueva Renca funciona con un ciclo combinado de 379 MW de potencia instalada, utilizando gas natural o diésel como combustibles.

El gas natural llega mediante el proveedor a la central, y es precalentado para luego ser utilizado en la turbina a gas. Luego de la combustión del gas y de que este realice trabajo en la turbina a gas, los gases de escape se utilizan en el generador de vapor por recuperación de calor (en adelante como “Heat recovery steam generator” o “HRSG”). El HRSG funciona con circulación natural de gas horizontal y con fuego suplementario. Con las características anteriores, trabaja calentando agua, intercambiando calor con los gases de escape para obtener vapor de agua a 3 presiones presiones. En el HRSG se tiene un conjunto de domos, encargados de dividir el vapor calentado conforme sus presiones y temperaturas, por lo que se tiene el domo de alta presión, de media presión, y de baja presión.

El vapor conseguido en el HRSG se utiliza para accionar el turbogenerador de vapor, mediante el movimiento de la turbina de vapor. Desde el supercalentador de alta presión se extrae vapor a 104 bar, los que son dirigidos a la turbina a alta presión. Después de esta etapa, el vapor entra a un sobrecalentador, para luego ingresar a la turbina de presión media, y luego fluir a la turbina de baja presión. El vapor de baja presión generado en el HRSG se envía directamente a la salida de la turbina de presión media, por lo que ingresa a la turbina de baja presión. De la turbina de baja presión, los gases salen por un gran conducto, en dirección al condensador. El vapor es condensado mediante el intercambio de calor con un flujo de agua, y luego es extraído con las bombas de alimentación para volver al HRSG, y así, repetir el ciclo.

2.2. Vacío en la operación del condensador

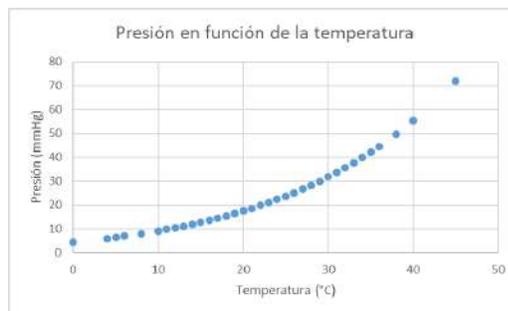
Un concepto fundamental para la comprensión de los futuros trabajos es el vacío en la central, específicamente, en la salida de la turbina de vapor de baja presión y en el condensador. Para una mejor comprensión se deben conocer los siguientes equipos y sistemas:

- Torre de refrigeramiento o TTRR: Consiste en una construcción de 20 m de altura aproximadamente, que en su zona superior cuenta con doce ventiladores que direccionan

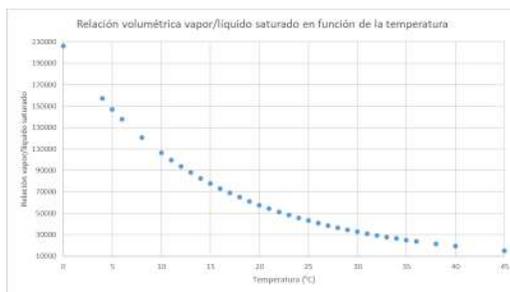
aire de manera ascendente. Por otro lado, inmediatamente debajo de los ventiladores, se encuentran aspersores, que reciben agua y la hacen bajar dispersada. Las gotas al descender intercambian calor mediante placas separadoras con el aire ascendente, bajando su temperatura.

- Agua de circulación: Corresponde a agua cruda extraída de pozos, que es depositada en la parte baja de la torre de refrigeración. Desde la torre, se impulsa mediante dos bombas de circulación hacia el condensador, donde intercambia calor, actuando como agua de enfriamiento del condensador y otros equipos más, y luego vuelve a la torre de refrigeramiento, a la zona superior, para caer mediante los aspersores y volver a enfriarse.
- Condensador: Corresponde al intercambiador de calor de tubos y carcasa de coraza única, con dos pasadas, que recibe el vapor que sale de la turbina de vapor de baja presión, y se encarga de condensarlo, mediante el intercambio de calor con el agua de circulación.
- Bombas de vacío: Tienen una conexión hacia el condensador, con el fin de extraer los gases no condensables del interior de este.

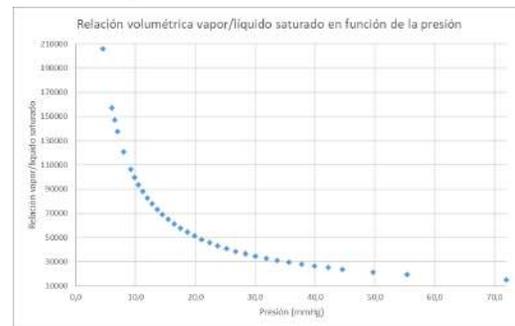
El condensador trabaja cambiando la fase del vapor entregado por la turbina de baja presión, pasando de estado gaseoso a líquido. La relación de volumen de vapor a líquido es la que se relaciona con el vacío, ya que al estar en una menor temperatura o menor presión, se logra comprimir un mayor volumen de vapor para lograr un determinado volumen de agua. Dichas relaciones se ven en los gráficos de la figura 2.1, donde los datos son extraídos de tablas de vapor [2], y la relación de volumen entre vapor y líquido se obtiene dividiendo el volumen específico del vapor por el volumen específico del líquido ante una cierta temperatura o presión.



(a) Presión en función de la temperatura



(b) Relación volumétrica en función de la temperatura



(c) Relación volumétrica en función de la presión

Figura 2.1: Variación de parámetros en agua saturada

De la figura 2.1.a se expone que una menor temperatura de agua saturada implica una menor presión. La caída de presión se justifica con los gráficos 2.1.b 2.1.c, donde tanto al bajar la temperatura como la presión, la relación de volumen entre vapor saturado y agua saturada crece. El condensador trabaja con una presión de diseño de 35 mmHg, lo que equivale a 31,7 °C, y a una compresión de volumen de vapor a líquido de 29967.

Para lograr una buena presión en el condensador, es fundamental la temperatura de agua de circulación que enfría el condensador, la cual, mientras más fría se ingrese, permite lograr menores valores de presión en el condensador. Por consiguiente, es primordial que la torre de refrigeramiento funcione correcta y eficientemente, para enfriar el agua de circulación que permitirá tener buenos valores de presión en el condensador.

Por otro lado, dado que la aislación del sistema no es perfecta, existen infiltraciones de gases no condensables en el condensador, que ingresan por perforaciones de las tuberías, por los sellos de los equipos, por la turbina, entre otras posibles entradas. Dichos gases se concentran en el condensador, y al no poder ser condensados, comienzan a afectar los niveles de presión. Para extraer estos gases, se utilizan dos bombas de vacío, las cuales tienen una conexión hacia el condensador, y evacúan los gases no condensables a la atmósfera.

Es importante saber cuanto puede variar el valor de la presión del condensador, para diferentes condiciones operacionales. Cuando se tienen altas temperaturas ambientales, la torre de refrigeración no enfría lo suficiente, lo que no permite lograr los 35 mmHg en el condensador. Por otro lado, cuando la planta tiene infiltraciones, también es complicado mantener la presión esperada, sino que tiende a ser mayor. La turbina de vapor de baja presión tiene gran importancia al momento de decidir el rango de presión admisible, donde en su manual se tiene la figura 2.2 [3].

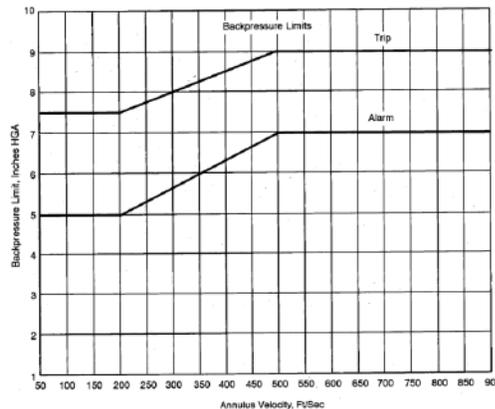


Figura 2.2: Presión operativa turbina de vapor baja presión [3]

De la figura 2.2, se pueden ver los límites superiores de presión que puede alcanzar la máquina, en función de la velocidad a la cual sale el vapor de la turbina a gas. El mínimo valor de presión que activa la alarma es 5 inch HgA, o 127 mmHg, lo que está bastante lejos de la presión de diseño del condensador. En cuanto a un límite mínimo, si bien no se indica ni en la turbina ni en el condensador, es posible que una bajar la presión bajo 35 mmHg genere daños en el condensador, en la turbina, o en los sellos de la turbina. Por lo anterior, siempre se busca mantener el condensador operando a 35 mmHg, o ligeramente superior, debido a las

condiciones operacionales.

2.3. Condensador principal

El sistema de condensado cumple varios propósitos. Primeramente, abastece de agua al domo de baja presión (HRSG) y al sistema de agua de enfriamiento de diferentes equipos. La siguiente función del sistema de condensado es condensar, captar y almacenar el vapor de escape de la turbina de vapor. El condensador principal es el encargado de condensar el vapor que sale de la última etapa de la turbina, y actúa como cámara de almacenamiento para el agua condensada.

El condensador principal funciona con vacío, y mantiene la presión correcta en el escape de la turbina. Para mantener el vacío, se utiliza un sistema de evacuación de aire del condensador, que está sacando constantemente el aire y los gases incondensables que se encuentran allí producto de infiltraciones, entre otras razones. Dichos gases se sitúan en el punto de mayor vacío de la coraza del condensador, por lo que desde aquí se extraen mediante una tubería y las bombas de vacío. Las bombas de condensado aspiran el agua de la fosa caliente, y la entregan a diferentes puntos, como a atemperadores, al condensador del vapor de sellos, entre otros. Operan a un caudal mínimo de $320 \text{ m}^3/\text{h}$ para satisfacer la demanda.

La parte inferior de la coraza del condensador constituye el depósito de almacenamiento, denominado fosa caliente, y se extiende a todo lo largo y ancho del condensador. De esta zona se inyecta o extrae agua desmineralizada, mediante válvulas de reposición y de rechazo respectivamente, para mantener el nivel de agua estable en torno a un punto de ajuste. El agua se entrega o extrae al tanque de agua desmineralizada.

El condensador principal está hecho de muchos tubos paralelos que pasan a través del condensador de superficie, una cámara que consta de una coraza grande de acero. El agua de circulación viaja por el interior de los tubos y tiene la función de extraer el calor del vapor que circula en torno a los tubos.

El condensador a ambos extremos cuenta con una plancha de tubos, donde por un extremo ingresa el agua de circulación, luego en el otro extremo se tiene una caja de agua de inversión donde el fluido da la vuelta, y vuelve en la dirección opuesta por otros tubos, saliendo por la misma zona por la cual ingresó. Para el caso del flujo de vapor, el condensador es de entrada lateral, es decir, el vapor de la turbina de escape axial ingresa por el costado del condensador en lugar de por su lado superior. Se expone un diagrama del condensador en la figura 2.3.

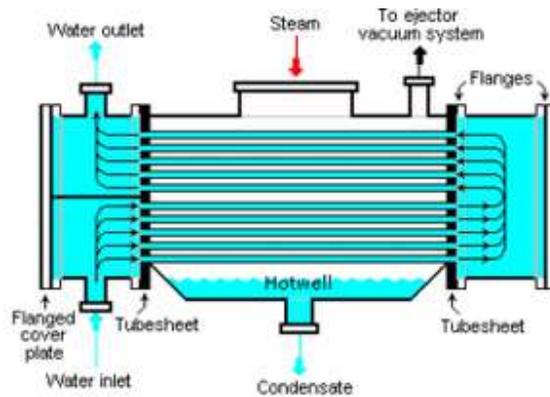


Figura 2.3: Diagrama condensador principal [4]

Las características importantes del condensador son:

- Tipo: Es de coraza única, con dos pasadas, y con caja de agua y fosa caliente divididas.
- Material:
 1. Tubos: 90-10 Cu-Ni.
 2. Coraza: Acero al carbono.
 3. Fosa caliente: Acero al carbono.
 4. Cajas de aguja: Acero al carbono, revestidas de epóxido de alquitrán.
 5. Placa tubular: Metal Muntz.
 6. Junta de expansión: Acero inoxidable.
- Capacidad nominal: 275447 KW.
- Presión nominal del condensador: 35 mm HgA.
- Presión de diseño dentro de los tubos: 3,5 barg.
- Presión dentro de la coraza: vacío y 1 barg.
- Número de tubos: 9572.
- Diámetro externo tubos: 31,75 mm.
- Largo tubos: 10 m.
- Largo efectivo tubos: 9,982 m.
- Capacidad nominal de flujo de vapor: 442.000 kg/h.
- Temperatura de saturación del condensado: 31,7 °C.
- Flujo de agua de enfriamiento: 29.650 m³/h.
- Temperatura referencial de entrada agua de enfriamiento: 18 °C.
- Temperatura referencial de salida agua de enfriamiento: 26 °C.

- Capacidad de almacenamiento hotwell: $36,9077 \text{ m}^3$.
- Peso aproximada del condensador con tubos:
 - Seco: 177355 kg.
 - Espacio del vapor relleno con agua: 507570 kg.

2.4. Sistema de extracción de aire

El vapor que sale de la última etapa de la turbina llega al condensador, y circula en torno a los tubos. La disposición de los deflectores permite dirigir eficazmente el vapor para pasar por todos los tubos. Durante su camino por los tubos, el vapor se mezcla con aire infiltrado. A medida que el vapor se condensa, el vacío se forma en el condensador. La mezcla restante de aire y vapor llega al extremo de admisión de agua de circulación, donde se efectúa un proceso de enfriamiento final antes de que la mezcla ingrese a la tubería conectada al equipo de extracción de aire del condensador.

Conforme lo anteriormente mencionado, el vacío se consigue primeramente mediante el cambio de fase del vapor a líquido, debido a su disminución de volumen. A una temperatura de saturación de $31,7 \text{ }^\circ\text{C}$, el volumen específico del vapor es $1,0048 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, mientras que del agua es $31,165 \text{ m}^3/\text{kg}$, por lo que con el cambio de fase un kg de vapor pasa a ocupar un volumen aproximadamente 30000 veces menor al ser un kg de agua. En segundo lugar, el vacío se ve favorecido por la extracción de los gases no condensables.

El sistema de extracción de aire se compone de una bomba de vacío, separador, silenciador y bomba de recirculación, e intercambiador de calor.

- Bomba de vacío: Se cuenta con dos bombas de vacío fabricadas por Nash-Kinema, las cuales son bombas de anillo líquido modelo AT1006. Están hechas de hierro con un eje de acero al carbono, y son propulsadas por un motor eléctrico de 60 HP, 380 V, trifásico, 50 Hz, funcionando a 750 rpm.
- Separador: Contiene una válvula de flotador interna para mantener el nivel correcto del agua de sellado.
- Silenciador: Está fijado a la descarga del separador.
- Bomba de recirculación: Recircula el agua de sellado de la bomba de vacío.

La bomba de vacío succiona directamente del condensador, eliminando los gases no condensables. Luego de salir de la bomba, la mezcla de aire y gas se dirige al separador para eliminar la humedad restante, y luego es descargada al silenciador, para finalmente salir a la atmósfera.

El diagrama P&ID del circuito se expone en la figura 2.4.

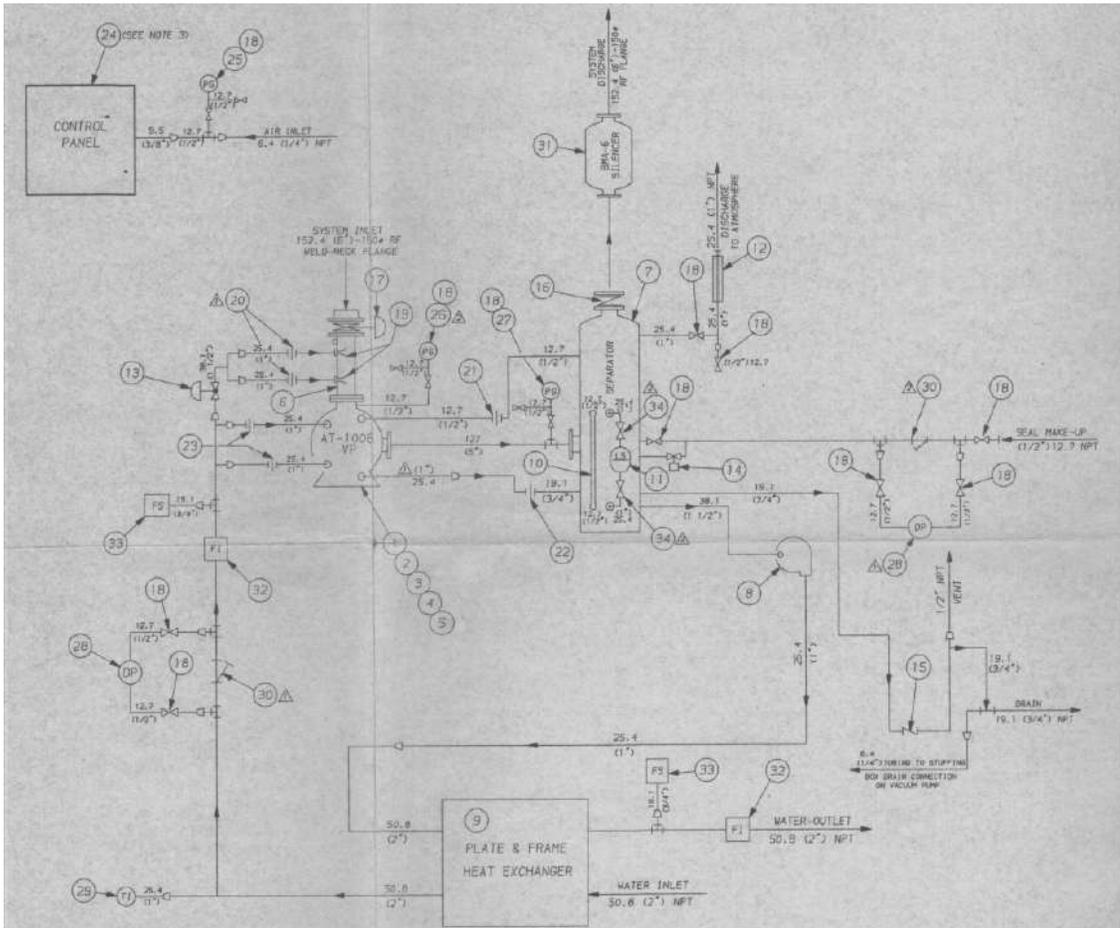


Figura 2.4: Diagrama P&ID sistema extracción de aire

Donde:

1. Bomba de vacío AT-1006.
2. Motor.
3. Acoplamiento.
4. Protección de acoplamiento.
5. Base estructural.
6. Colector de entrada.
7. Separador.
8. Bomba centrífuga.
9. Intercambiador de calor agua de sello.
10. Indicador de vidrio.
11. Switch de nivel.

12. Rotámetro.
13. Válvula de bola con actuador neumático.
14. Válvula solenoide para reposición agua de sello.
15. Válvula check de drenaje.
16. Válvula check con mango para la descarga del sistema.
17. Válvula mariposa con actuador neumático para la entrada del sistema.
18. Válvula globo.
19. Boquilla de pulverización.
20. Unión orificio.
21. Unión orificio.
22. Unión orificio.
23. Unión orificio.
24. Panel de control.
25. Manómetro.
26. Vacuómetro.
27. Mano-vacuómetro.
28. Manómetro diferencial.
29. Indicador de temperatura con vaina protectora.
30. Purga.

2.5. Bomba de extracción gases no condensables

2.5.1. Funcionamiento de la bomba

La bomba de Nash corresponde a una bomba de vacío de anillo líquido, la cual es una máquina giratoria de desplazamiento positivo que proporciona vacío para procesos en aplicaciones industriales, en este caso, en la generación de energía eléctrica. La bomba de vacío a estudiar utiliza agua como elemento de sellado, y cuenta con dos etapas. En la figura 2.5 se expone un esquema de la bomba. Un motor eléctrico se acopla de manera directa o mediante una correa en V al eje de la bomba. Dicho eje está conectado a los rotores de ambas etapas, por lo que comparten su velocidad de giro.

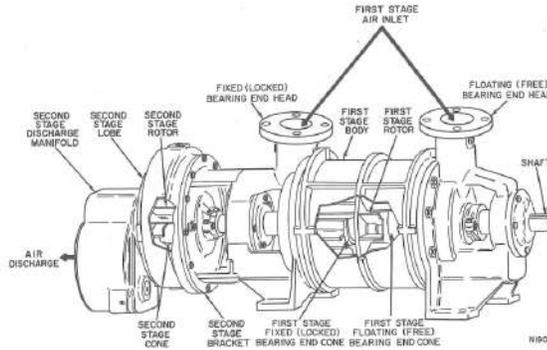


Figura 2.5: Componentes principales bomba [5]

Para la comprensión del funcionamiento de la bomba, se muestra primeramente el esquema de la figura 2.6. Los rotores de ambas etapas giran sin contacto con el cuerpo de la bomba (pump body). El rotor cuenta con un conjunto de aspas curvadas conforme la dirección de rotación, donde los espacios entre las aspas los denominaremos como cámaras. En torno al rotor se encuentra el líquido que actúa como sello (liquid ring), el cual es agua. El rotor se encuentra descentrado desde el centro del cuerpo de la bomba. El gas recorre la bomba con la secuencia: entrada (inlet), punto de entrada (inlet port), plato (port plate), punto de salida (discharge port) y salida (discharge).

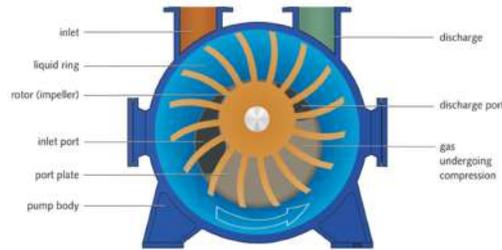


Figura 2.6: Esquema rotor bomba [6]

En cuando a la función de las cámaras del rotor, se expone la figura 2.7, donde se explican a continuación los pasos realizados la cámara resaltada en rojo:

1. En la figura 2.7.a se aprecia el punto A, la cámara está llena con el líquido de sello, la cual gira en conjunto al rotor, pero se mantiene en el contorno del cuerpo de la bomba.
2. En la figura 2.7.b se aprecia el punto B, donde gracias al giro el líquido se retira de la cámara y la vacía. Este vacío es cubierto por el flujo entrante a la bomba, representado con partículas blancas, el cual está en estado gaseoso e ingresa por el punto de entrada del rotor.
3. En la figura 2.7.c se aprecia el punto C, donde el líquido de sello comienza nuevamente a entrar en la cámara, comprimiendo el flujo gaseoso.
4. En la figura 2.7.d se aprecia el punto D, donde el líquido de sello comprime al aire y lo expulsa del rotor por el punto de salida.

El ciclo descrito anteriormente se repite por cada revolución del rotor, en cada una de sus cámaras. Se puede notar que el ciclo se asemeja al comportamiento de un pistón.

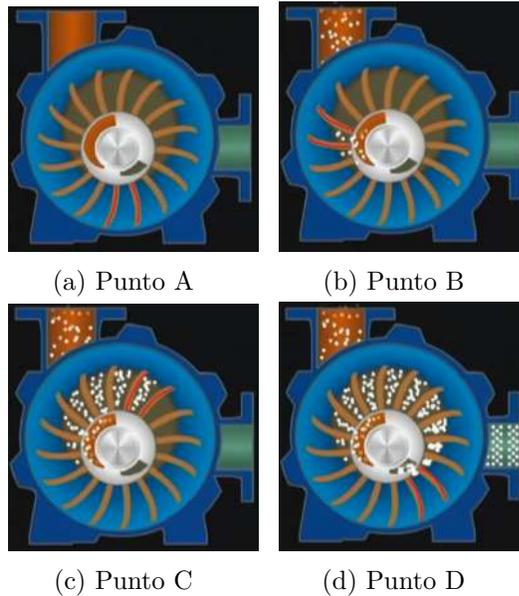


Figura 2.7: Principios de funcionamiento [6]

Se debe recordar que la bomba estudiada corresponde a una bomba con dos etapas. Luego de que el flujo cumpla con el ciclo descrito previamente en la primera etapa, se descarga en el colector de descarga. Dicho colector utiliza una válvula de retención, que permite trabajar con un bajo o alto vacío.

Si se quiere operar con un bajo vacío, la válvula de retención se mantiene abierta, permitiendo que la descarga de la primera etapa fluya directamente al exterior. Entonces, con la válvula de retención abierta, solo la primera etapa de la bomba de vacío entrega un flujo de salida.

Por otro lado, si se requiere trabajar con un alto vacío, se debe mantener cerrada la válvula de retención. La descarga de la primera etapa entra a la segunda etapa, y luego sale nuevamente al colector de descarga para que el flujo fluya al exterior.

Gracias a la versatilidad de la bomba en cuanto a su funcionamiento en dos etapas, resulta importante lograr calibrar la configuración óptima de operación para obtener la mayor eficiencia posible.

Para una mejor comprensión de las operaciones de la bomba en bajo y alto vacío se expone la figura 2.8, donde la flecha negra gruesa corresponde al flujo gaseoso mezclado con líquido de sello.

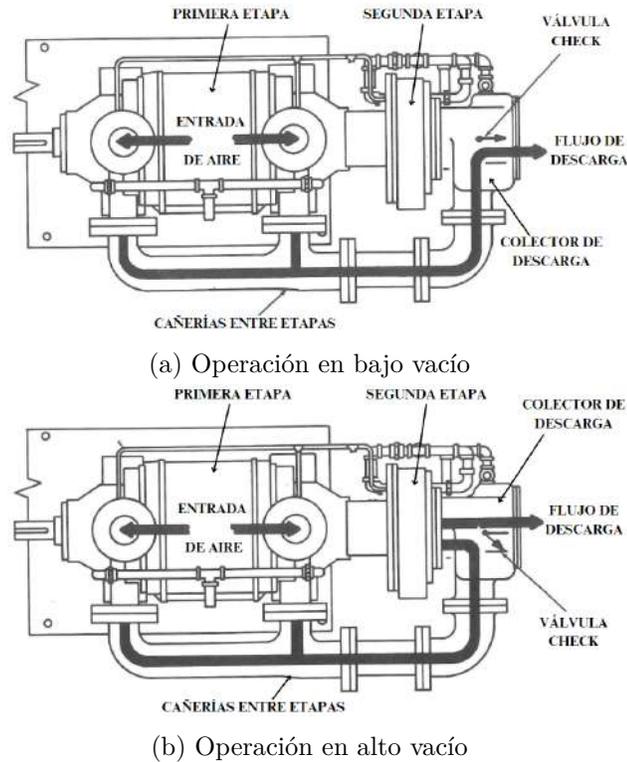


Figura 2.8: Operación de la bomba en bajo y alto vacío [5]

2.5.2. Agua de sellado

El agua entra inicialmente al sistema por la línea de rellenado del agua de sellado al separador, donde su nivel correcto lo mantiene una válvula de flotador. El agua de sello sigue un ciclo cerrado, recorriendo en orden el separador, la bomba centrífuga de recirculación, el intercambiador de calor de placas y la bomba de vacío. La bomba centrífuga se encarga de impulsar el flujo. En la bomba de vacío, el agua de sellado es proporcionada al múltiple de entrada y a las dos boquillas de rociado del tubo de aspiración. El líquido de sello es aplicado en la bomba para mantener cierto nivel y sellar la zona entre el rotor y el cono apreciado en la figura 2.5. El rociado de este líquido se junta con la mezcla vapor y gases, con lo que permite condensar la mayor parte del vapor de agua de la mezcla, y así, entran a la bomba. Con la descarga de la bomba de vacío hacia el separador, el líquido sale de la bomba junto al flujo de aire y son separados. El separador tiene sensores y válvulas para mantener su nivel. Los prensaestopas de la bomba de vacío contienen anillos de empaque, y en la primera etapa, sellos de casquillo de linterna. Estos prensaestopas son lubricados por el líquido. El líquido es aplicado en la primera etapa a una presión de 115 a 136 kPa (2 a 5 psig). Los gases separados del líquido de sello pasan a través de la boca de salida del separador, y a través de la válvula de retención de descarga hacia la atmósfera. Se requiere agua de enfriamiento, utilizada en el intercambiador de calor de placas, para enfriar el agua de sellado, la cual baja su temperatura en aproximadamente 8 °C.

2.5.3. Características de la bomba conforme el manual

Conforme al manual, para la bomba estudiada se requiere un suministro del líquido de sello de 30 GPM o 114 l/min. La variación de este caudal puede afectar el rendimiento de la bomba. El caudal debe ser regulado, lo cual se puede lograr con una válvula de ajuste y manómetro, o mediante una válvula de control de flujo. Estos sistemas de control producen un impacto positivo en el funcionamiento y rendimiento de la bomba.

En la figura 2.9 se muestra la curva de rendimiento de la bomba a 880 RPM, según el proveedor, donde el eje vertical corresponde al flujo medido en pies cúbicos por minuto (CFM), y el eje horizontal a la presión interna absoluta medida en pulgadas columna de mercurio.

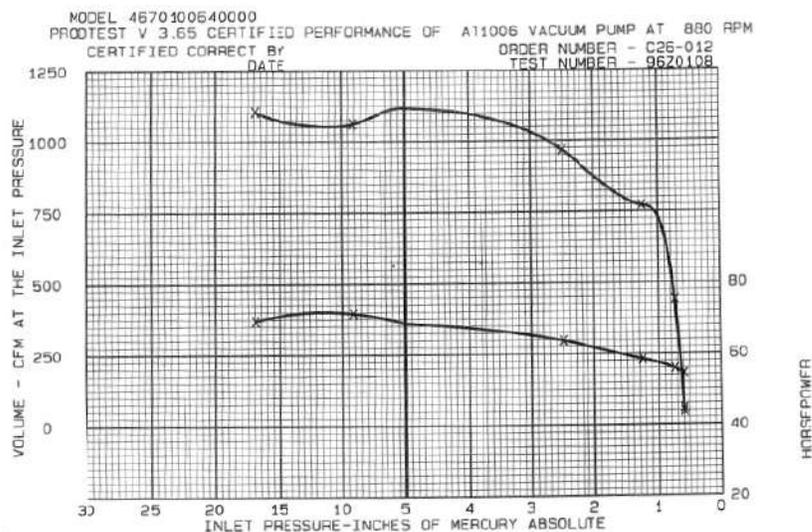


Figura 2.9: Curva de rendimiento de la bomba a 880 RPM [5]

Además, el líquido de sello debe cumplir las características de la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Condiciones y calidad de agua para la generación del anillo líquido según estándar NASH [5]

Alimentación de agua de sello	Simétrica	
Calidad del agua de sello	PH	7,0 o mayor
	Sólidos disueltos	Menor a 1000 ppm
	Conductividad	Menor a 2000 micromhos
	Cloruros	Menor a 200 ppm
	Sulfatos	Menor a 200 ppm
	Dureza	Menor a 300 ppm CaCO ₃
	Total de sólidos abrasivos (tamaño típico de 10 microns)	Menor a 50 ppm

2.5.4. Características de la bomba en operación

En el 2014 se le realizaron pruebas a la bomba con el fin de evaluar su rendimiento relativo al rendimiento indicado por la bomba nueva 2.9. Para lo anterior, se utilizó el método de las placas de orificios múltiples. El procedimiento consiste en utilizar una placa con 16 orificios en la entrada de flujo de la bomba, donde se realizan mediciones en los parámetros de la bomba, y luego se procede a tapar un orificio. Esta acción se repite hasta que solo quede uno sin tapar. Cada vez que se tapa un orificio, se genera un mayor vacío, que permite generar una curva de capacidad. La comparación de los rendimientos de la bomba nueva y la estudiada permiten obtener el porcentaje de eficiencia en cada una de las succiones. La eficiencia se calcula en base a la capacidad volumétrica de la bomba, es decir, comparando el caudal de aire nominal con el real.

Las mediciones permiten obtener un 60,11% de eficiencia promedio [7], y se obtiene la curva de rendimiento mecánico de la figura 2.10. Los resultados fueron calculados considerando la velocidad de giro de la bomba a 880 RPM según la información del diseño. Cabe destacar que para estas mediciones se utilizó un sistema externo adicional para el suministro de agua de sello, por lo que no es constante y puede alterar las mediciones.

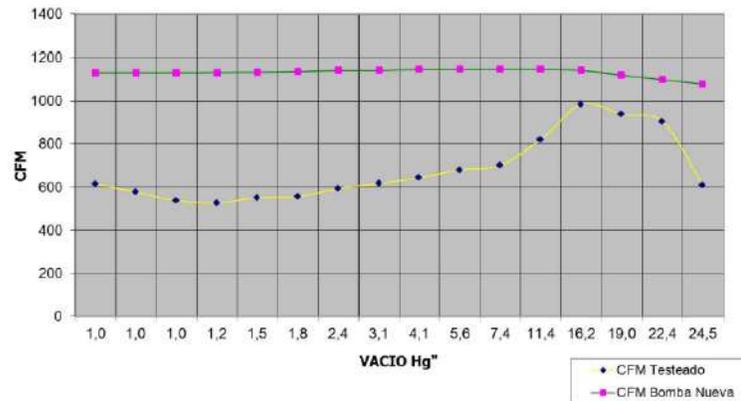


Figura 2.10: Curvas de rendimiento mecánico 2014 [7]

Dichas mediciones se repitieron para la misma bomba en el año 2022, donde se obtuvo una eficiencia promedio de 85,64% [8]. Sin embargo, en esta ocasión los resultados fueron calculados considerando la velocidad de giro de la bomba a 743 RPM según lo testeado en terreno. La curva de rendimiento mecánico se expone en la figura 2.11.

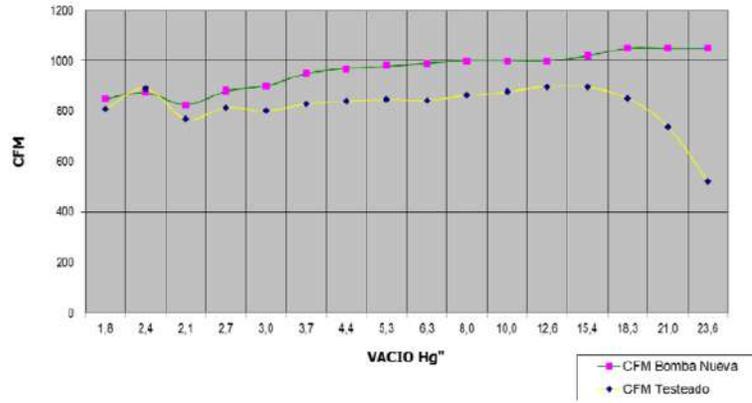


Figura 2.11: Curvas de rendimiento mecánico 2022 [8]

Capítulo 3

Memoria de cálculo

3.1. Intercambiadores de calor

La configuración predominante de intercambiadores de calor posee dos flujos, donde el más caliente transfiere su energía al fluido más frío. La manera e la cual circulan los flujos dentro de un intercambiador de calor es importante, donde se suele utilizar el intercambio a contraflujo o contracorriente, como se expone en la figura 3.1. En este caso los fluidos frío y caliente entran al intercambiador por extremos opuestos. En el caso límite, el fluido frío se puede calentar solo hasta la temperatura de entrada del fluido caliente, pero no superarla.

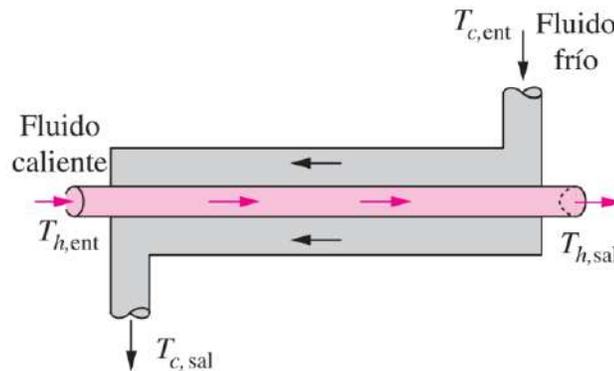


Figura 3.1: Intercambiador de calor de doble tubo a contraflujo [9]

Se utilizará la siguientes variables:

- T_e : Temperatura de entrada del fluido más caliente.
- T_s : Temperatura de salida del fluido más caliente.
- t_e : Temperatura de entrada del fluido más frío.
- t_s : Temperatura de salida del fluido más frío.
- ΔT_1 : Para contraflujo es $T_s - t_e$ (K).
- ΔT_2 : Para contraflujo es $T_e - t_s$ (K).

Temperatura representativa en contraflujo

El cambio de temperatura no es uniforme a lo largo de un intercambiador, por lo que la diferencia de temperatura representativa es la diferencia media logarítmica calculada con la ecuación 3.1.

$$\Delta T_{log,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (K) \quad (3.1)$$

Donde:

- ΔT_1 : Para contraflujo es $T_s - t_e$ (K).
- ΔT_2 : Para contraflujo es $T_e - t_s$ (K).

Factor de corrección

Para trabajar con otras geometrías de intercambiadores, como de flujo cruzado y de tubos y coraza de pasos múltiples, se utiliza la ecuación 3.2.

$$\Delta T_{log} = F \cdot \Delta T_{log,CF} \quad (K) \quad (3.2)$$

Donde:

- F : Factor de corrección.

El factor de corrección depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y salida de los flujos caliente y frío. El factor de corrección es $F = 1$ para un condensador o una caldera, sin importar la configuración del intercambiador de calor.

Ecuación de transferencia

Para calcular el calor intercambiado en un intercambiador de calor, se utiliza la ecuación 3.3.

$$\dot{Q} = U \cdot A_s \cdot \Delta T_{log} \quad (W) \quad (3.3)$$

Donde:

- U : Coeficiente total de transferencia de calor ($W/(m^2K)$).
- A_s : Área de transferencia de calor (m^2).
- ΔT_{log} : Diferencia media logarítmica (K).

En el caso de necesitar el valor del coeficiente total de transferencia de calor se puede reordenar la ecuación, como se ve en la ecuación 3.4.

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_s \cdot \Delta T_{log}} \quad \left(\frac{W}{m^2K} \right) \quad (3.4)$$

3.2. Condensador

Área de intercambio

Se puede obtener el área superficial de intercambio térmico considerando el área del manto de cada tubo del condensador, y luego multiplicando por el número de tubos, como se expone en la ecuación 3.5.

$$A_s = \pi \cdot D_{ext} \cdot L \cdot N \quad (m^2) \quad (3.5)$$

Donde:

- D_{ext} : Diámetro externo de los tubos (m).
- L: Largo de los tubos (m).
- N: Número de tubos.

Eficiencia condensador

Del condensador se puede calcular su eficiencia con la ecuación 3.6 [10].

$$\epsilon = \frac{t_s - t_e}{T_{sat} - t_e} \quad (3.6)$$

Donde:

- T_{sat} : Temperatura de saturación en el condensador (K). Es equivalente a T_e y T_s .

Volumen ocupado por el vapor en el condensador

Si conocemos el peso que tiene el condensador seco, y luego el peso del condensador al rellenar el espacio que ocupará el vapor de agua únicamente con agua líquida, se puede calcular la diferencia para conocer el peso de agua en el espacio de interés. Sin embargo, este espacio relleno, corresponde al espacio ocupado por el vapor de agua junto a la fosa caliente o hotwell expuesto en la figura 2.3. Si usamos el peso para calcular el volumen de agua, y luego se resta el volumen de la fosa caliente, se obtiene el volumen ocupado por el vapor en el condensador, tal como expone la ecuación 3.7.

$$V_{vapor} = \frac{M_{relleno} - M_{seco}}{\rho_{agua}} - V_{fosa} \quad (3.7)$$

Donde:

- V_{vapor} : Volumen ocupado por el vapor de agua en el condensador (m^3).
- $M_{relleno}$: Masa del condensador con su espacio del vapor relleno con agua (kg).
- M_{seco} : Masa del condensador seco (kg).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).
- V_{fosa} : Volumen de la fosa caliente del condensador.

3.2.1. Presiones totales y parciales

Para conocer las infiltraciones en un volumen de control, como el volumen interno del condensador, es necesario conocer cuanto aire ingresa al condensador, el cual trabaja con agua en estado gaseoso.

Presión condensador

La ley de presión parcial de Dalton postula que la presión total de una mezcla de gases ideales es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que componen la mezcla. Con lo anterior, la presión dentro del condensador sería la expuesta en la ecuación 3.8.

$$P_{cond} = P_{H_2O} + P_{aire} \quad (mmHg) \quad (3.8)$$

Donde:

- P_{H_2O} : Presión parcial del agua (mmHg).
- P_{aire} : Presión parcial del aire (mmHg).

Moles de aire en condensador

Despejando la presión del aire de la ecuación 3.8, y aplicando la ley de los gases ideales se obtiene la ecuación 3.9

$$n_{aire} = \frac{(P_{cond} - P_{H_2O}) \cdot V}{R \cdot T_{cond}} \quad (mol) \quad (3.9)$$

Donde:

- V : Volumen interno del condensador (m^3).
- R : Constante de los gases ideales.
- T_{cond} : Temperatura al interior del condensador (K).

Volumen de aire en el condensador

El volumen de aire al interior del condensador se calcula en unidad volumétrica estándar, por lo que se utiliza la ley de los gases ideales, pero con condiciones estándar, como se expone en la ecuación 3.10.

$$V_{aire} = \frac{n_{aire} \cdot R \cdot T_{est}}{P_{est}} \quad (Sm^3) \quad (3.10)$$

Donde:

- T_{est} : Temperatura estándar 288 K [11].
- P_{est} : Presión estándar 760 mmHg [11].

Los moles de aire de la ecuación 3.10 pueden ser reemplazados por la ecuación 3.9, lo que permite obtener la ecuación 3.11.

$$V_{aire} = \frac{(P_{cond} - P_{H_2O}) \cdot V}{R \cdot T_{cond}} \cdot \frac{R \cdot T_{est}}{P_{est}} \quad (Sm^3)$$

$$V_{aire} = \frac{(P_{cond} - P_{H_2O}) \cdot V \cdot T_{est}}{T_{cond} \cdot P_{est}} \quad (Sm^3) \quad (3.11)$$

Caudal volumétrico infiltraciones condensador

Para calcular el caudal volumétrico de infiltraciones en el condensador, bastaría con dividir el volumen que ingresó en el tiempo durante el cual se infiltró, tal como se muestra en la ecuación 3.12.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad \left(\frac{Sm^3}{s}\right) \quad (3.12)$$

Donde:

- t: Tiempo de prueba (s).

El volumen de aire de la ecuación 3.12 puede ser reemplazado por la ecuación 3.11, lo que permite obtener la ecuación 3.13.

$$\dot{V} = \frac{(P_{cond} - P_{H_2O}) \cdot V \cdot T_{est}}{T_{cond} \cdot P_{est} \cdot t} \quad \left(\frac{Sm^3}{s}\right) \quad (3.13)$$

Capítulo 4

Metodología

La metodología para desarrollar el trabajo tiene los siguientes pasos:

1. Reconocimiento del sistema

En este primer paso se estudian los documentos relacionados al sistema de extracción de aire del condensador, como el manual de la bomba, condensador y turbina a vapor, planos del sistema, pruebas realizadas en el sistema y mediciones históricas.

Luego de tener un buen dominio en cuanto a la teoría del sistema, se realiza un levantamiento del sistema de extracción de vacío en terreno, donde inicialmente se evalúa el estado del sistema. Se cuantifica y categoriza los componentes del sistema, como bombas, instrumentos, válvulas, líneas de cañerías, separadores, silenciadores y intercambiadores de calor. Dichos elementos se agregan a un plano P&ID actualizado. Se codifican todos los elementos que no estén en el sistema actualmente, para poder tener un control de sus intervenciones.

2. Análisis de pérdida de vacío en el condensador

Se investiga la causa responsable de la dificultad de control de presión en el condensador. Se calcula el calor intercambiado y la eficiencia de este mismo, y con ello se encuentra la relación entre parámetros operacionales. Se determina la influencia del agua de enfriamiento para el correcto funcionamiento del condensador. Se cuantifican las infiltraciones del equipo, con el fin de evaluar si tiene relación con el problema de control de presión. Además, se expone un método para la identificación de infiltraciones en el sistema.

3. Mejoras del sistema

Se realizan mejoras en el sistema, primeramente enfocadas en la eliminación de infiltraciones en el condensador, y luego, enfocadas en el control de la bomba y el estado de sus componentes. Se investiga la información disponible en sala de control del sistema de extracción de aire, y se generan tareas para la revisión de los flujómetros, interruptores de presión y válvulas solenoides de la reposición de agua.

4. Conclusiones

Finalmente, se sintetiza el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo, destacando los puntos importantes y proponiendo posibles mejoras y tareas a seguir en un futuro.

Capítulo 5

Desarrollo

5.1. Problema inicial

Tal como se menciona en los antecedentes, el condensador principal de la planta requiere de el sistema de extracción de aire para funcionar correctamente. El parámetro de control es la presión en el interior del condensador. La planta cuenta en su sistema de extracción de aire con dos bombas de vacío conectadas en paralelo, donde la condición de diseño indica que se debe mantener una bomba de vacío encendida, y la otra como respaldo. Dado que no se logra conservar una correcta presión con una bomba activa, se encienden ambas para la operación de la planta.

Por otro lado, en los años 2014 y 2022 se realizaron pruebas de rendimiento en las bombas de vacío. Durante dichas pruebas, la empresa que brindó el servicio afirmó que la diferencia de rendimiento de las bombas actuales respecto a las bombas nuevas podía deberse a que la bomba opera con una única etapa.

Según se indica en los antecedentes, la bomba posee dos etapas, donde una válvula determina si opera con una o dos etapas. Ante esto, la conclusión de la empresa externa afirma que no se encuentra habilitado el paso entre etapas, por lo que debería removerse un tapón ubicado en la segunda etapa, y realizar la conexión mediante cañerías.

Con todo lo anterior, el problema inicial es buscar el motivo del problema de pérdida de vacío, que provoca que sea necesaria la utilización de dos bombas, y que se puede deber a la pérdida de eficiencia de las bombas, u otro factor a investigar. También se debe analizar el uso de dos etapas de la bomba, y ver las posibles mejoras del sistema de extracción de aire.

En base a todo lo mencionado anteriormente, primeramente se debe realizar un reconocimiento en terreno del sistema de extracción de vacío, con el fin de reconocer los diferentes elementos, determinar la accesibilidad a los diferentes componentes, evaluar el apoyo de personal para la realización de pruebas, y reconocer los instrumentos de medición.

5.2. Reconocimiento del sistema

En esta etapa preliminar se investigan numerosos documentos entregados por GM, relacionados a la operación de la planta, manuales de la bomba de vacío, del condensador, de la turbina de vapor, de la torre de refrigeración y de los sistemas de agua, donde la información indispensable para este trabajo es expuesta en los antecedentes.

También se asiste a terreno con el fin del reconocimiento del estado actual de la bomba. Se debe destacar que por diseño la planta debe operar con una bomba de vacío, y por seguridad y redundancia se tienen dos, la bomba A y B, , donde se expone una imagen de la bomba A en la figura 5.1.a. En terreno se aprecia que ambas bombas están en funcionamiento, lo cual es una situación anormal y ajena a las condiciones de diseño de la planta. También se aprecia que la bomba está con fugas de agua, tal como se ve en la figura 5.1.b.



(a) Bomba en terreno



(b) Fugas en la bomba

Figura 5.1: Bomba en terreno

5.3. Fugas en la bomba

Las fugas en la bomba se presentan por dos motivos:

- Fugas en el drenaje del separador.
- Problemas en las empaquetaduras.

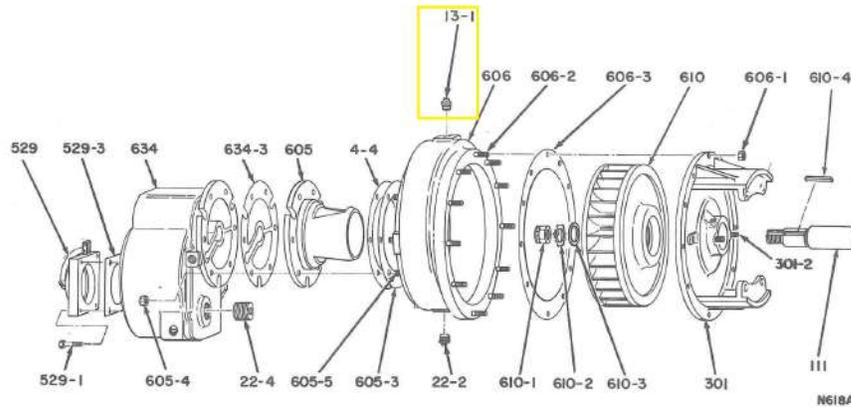
Para ambos problemas, los operadores de terreno lo detectan y reportan, y el equipo de mantenimiento realiza la reparación.

En el primer caso, el 20 de marzo del 2024 se identifico exceso de agua en el sector de la bomba B, tal como muestra la bomba 5.1.b. Se realiza una inspección donde se encuentra que la línea de drenaje se encuentra obstruida. Por lo anterior, se destapa la línea, y se mejora la conexión del drenaje para evitar estas fugas.

En el segundo caso, se verifica que las empaquetaduras de la bomba estén correctamente instaladas. Luego, se realiza el apriete de prensa de la bomba, con lo cual se logran eliminar las fugas de agua.

5.4. Conexión entre etapas de la bomba

El tapón al cual se hace referencia que debe habilitarse para la conexión de las etapas de la bomba se expone encerrado en un cuadro amarillo, en la imagen 5.2.



(a) Vista explosionada segunda etapa [5]



(b) Tapón segunda etapa bomba A



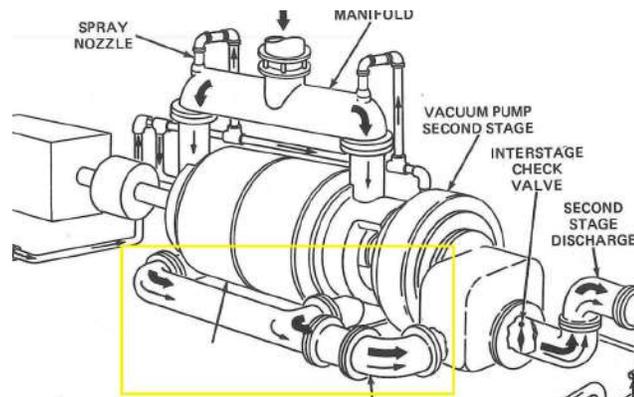
(c) Tapón segunda etapa bomba B

Figura 5.2: Tapón segunda etapa

Se debe mencionar, que el tapón es diferente en las bombas, donde el tapón de la bomba A es el indicado por el manual. Sin embargo, ambos cumplen la misma función, y solo varia

la herramienta necesaria para la extracción del tapón.

Por otro lado, la conexión entre etapas se expone encerrada en un cuatro amarillo, en la figura 5.3.



(a) Conexión entre etapas [5]



(b) Conexión entre etapas bomba B

Figura 5.3: Conexión entre etapas

Tal como se ve en la figura 5.3, la bomba en terreno tiene la misma configuración indicada en su manual, expuesta en la figura 5.3.a, donde la conexión entre etapas existe a un costado de la bomba. Cabe destacar que la figura 5.3.b corresponde a la bomba B, y la bomba A tiene la misma configuración. Por otro lado, la bomba cuenta con un eje conectado a ambos rotores de las etapas, por lo cual, solo se necesita accionar la válvula de retención ubicada en la segunda etapa para permitir el uso de ambas etapas, o solo de la primera, tal como se aprecia en la figura 2.8. Dicha válvula funciona de manera mecánica y automática.

Ante lo anterior, la afirmación de la empresa externa que realizó mediciones en los años 2014 y 2022 es incorrecta, ya que la bomba cuenta con la conexión entre etapas. El tapón identificado tiene como propósito ser removido para posteriormente instalar un cáncamo, y así facilitar el desarme de la bomba, tal como se expone en la figura 5.4.

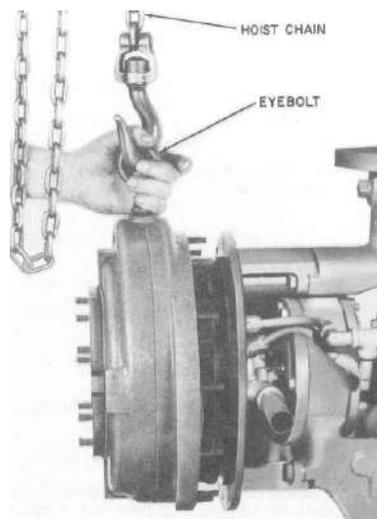


Figura 5.4: Cáncamo en la ranura del tapón [5]

5.5. P&ID

La bomba cuenta con diferentes instrumentos de medición en terreno, junto con un panel de control autónomo a la sala de control. Desde sala de control se regula el estado de la bomba, la cual puede ser: apagado, automático o encendido. Todas las demás acciones se controlan desde el panel local.

Si bien el P&ID del circuito de extracción de gases no condensables se encuentra en los antecedentes, las bombas han sido operadas durante 27 años, por lo que su instalación ha cambiado. Además, el P&ID entregado por el fabricante no considera el sistema completamente, es decir, desde la conexión del sistema con el condensador, hasta la salida de los gases no condensables a la atmósfera. Por esta razón, se desarrollo previo a este trabajo un plano P&ID actualizado de la bomba, expuesto en la figura 5.5.

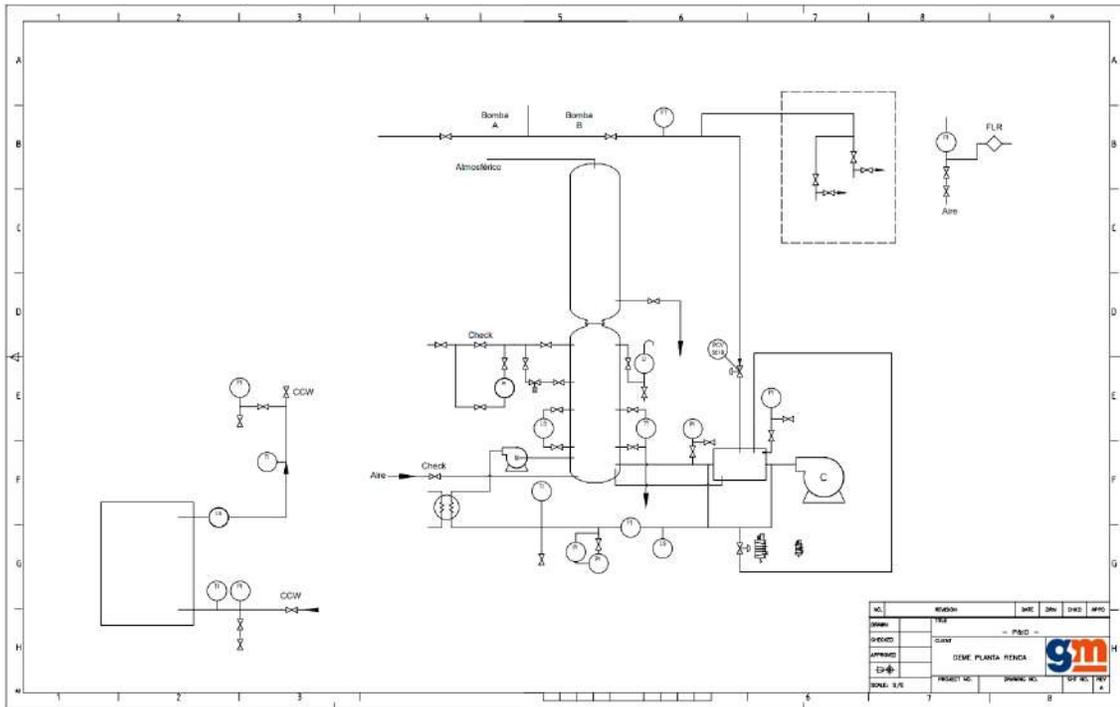


Figura 5.5: P&ID nuevo versión A

El plano anterior contiene múltiples errores, por lo que se actualiza, mediante observaciones en terreno, corrigiendo errores, y agregando la información que falta. El plano actualizado contempla todo el sistema de extracción de aire de gases no condensables, comenzando desde el punto de extracción en el condensador hasta el escape de los gases, y considerando el panel de control, y el sistema neumático utilizado para el control de las válvulas. Para la realización del nuevo plano se utilizan los planos creados por la compañía Nash-Kinema Inc., los planos de la planta creados por la compañía Bechtel International, Inc., la observación de los componentes en terreno, los manuales de operación de la planta y la codificación de componentes utilizada por la empresa.

Para la creación de la simbología en el plano P&ID se utilizan los planos de símbolos y leyendas proporcionados por Bechtel International, Inc., donde se exponen los símbolos a utilizar en la tabla 5.1. El plano también se basa en el estándar ISA 5.1.

Tabla 5.1: Simbología P&ID

Descripción	Símbolo
Bomba centrífuga horizontal	
Bomba de vacío	
Línea de flujo	
Señal neumática	
Conector de cañerías	
Válvula	
Válvula de globo	
Válvula de bola	
Válvula de retención	
Válvula de mariposa	
Filtro tipo Y	

El plano actualizado generado se expone en la figura 5.6 Dicho plano es el punto inicial para la mejora del sistema de extracción de vacío.

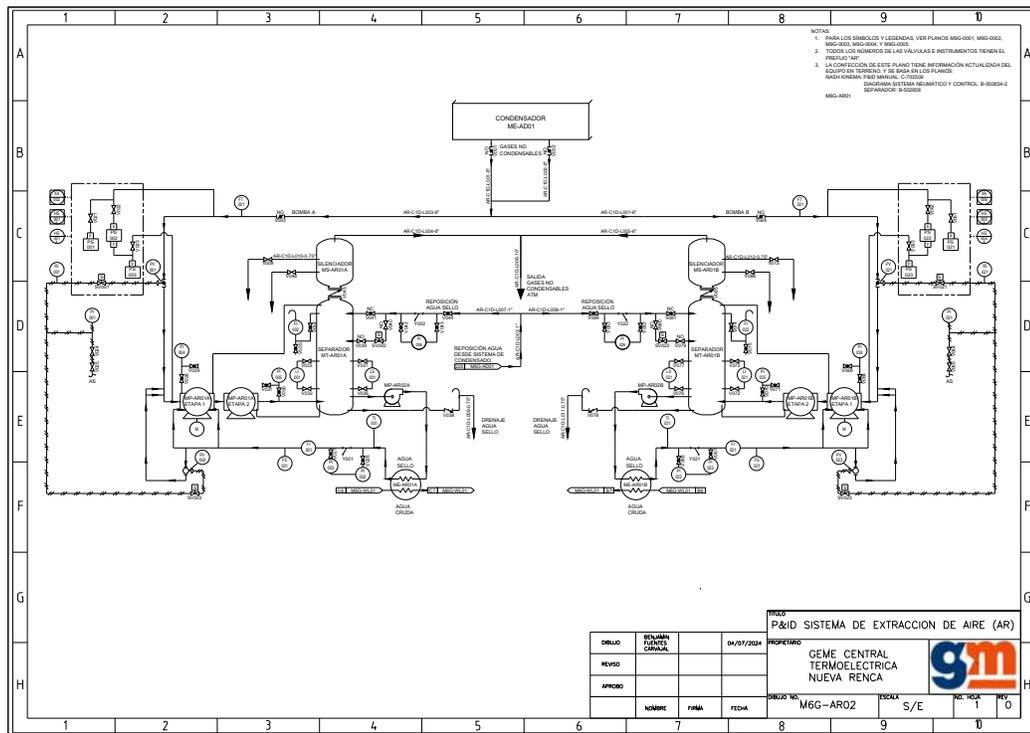


Figura 5.6: P&ID nuevo versión 1

Del plano 5.6 se tienen nueve elementos que están conectados mediante cables eléctricos al panel de control:

1. Válvula solenoide SV001 en bomba A y SV021 en bomba B. Permite el control de la válvula PV001 en la bomba A, y PV021 en la bomba B. Dichas válvulas determinan si se permite el paso para la extracción de gases no condensables.
2. Válvula solenoide SV002 en bomba A y SV022 en bomba B. Se encargan de controlar la reposición de agua de sello del separador.
3. Válvula solenoide SV003 en bomba A y SV023 en bomba B. Permite el control de la válvula PV003 en la bomba A, y PV023 en la bomba B. Dichas válvulas determinan si se permite el paso de agua de sello para la entrada de la bomba de vacío.
4. Interruptor de nivel LS001 en bomba A y LS021 en bomba B. Permite medir el nivel de agua en el separador.
5. Interruptor de flujo FS001 en bomba A y FS021 en bomba B.
6. Tres switch de presión en el panel, PS001, PS002 y PS003 para la bomba A, y PS021, PS022 y PS023 para la bomba B.

Además, los transmisores de flujo FT001 y FT021 están conectados eléctricamente a una caja eléctrica independiente del panel.

Es importante reconocer los elementos que se encuentran conectados eléctricamente, ya permiten saber que señales se pueden monitorear desde sala de control, y por otro lado, comprender la lógica de control del panel de control autónomo, y eventualmente cambiarlo.

5.6. Creación KKS

La codificación KKS corresponde a una codificación especial enfocada en las plantas de potencia o ciclos combinados. Permite mediante la codificación de letras, categorizar los diferentes equipos de la planta, relacionándolos con el sistema al cual pertenecen, y la naturaleza de su componente. Dentro del software SAP utilizado para la gestión de la planta, se tiene el "árbol KKS", el cual corresponde a un diagrama desplegable que permite identificar los equipos acorde al sistema al cual pertenece. Cada vez que se realiza alguna actividad en un equipo o componente de la planta, se registra en el sistema SAP, asociando la actividad al código KKS respectivo. Lo anterior permite tener un control histórico de las fallas de los equipos, sus cambios de componentes y sus mantenimientos.

En particular, para el sistema de extracción de aire del condensador, con el levantamiento del P&ID se encontraron 134 elementos codificables, los cuales se dividen como se muestra a continuación:

- Válvulas: 72.
- Instrumentos: 36.
- Líneas: 12.
- Filtros tipo "Y": 4.
- Bombas: 4.
- Separador: 2.
- Silenciador: 2.
- Intercambiador de calor: 2.

De lo anterior, en sistema solo existían 31 elementos codificados. Por ello se realizó la creación de códigos en base a la codificación KKS del año 2021 [12]. Los códigos serán cargados por el responsable de la actualización de datos de KKS, y permitirá controlar a futuro los historiales de cada componente del sistema de vacío, los que actualmente no contaban con control. Los componentes que ya contaban con un KKS, tenían una mala clasificación, por lo que se migraron sus historiales a los nuevos códigos correspondientes.

5.7. Enfoque de las mejoras

Tras un estudio exhaustivo de documentación, donde se incluyen los manuales de los equipos, manuales de operación de la planta y planos, y, por otro lado, la comunicación con diferente personal de la planta, donde se habló con el personal de mantenimiento, jefes de turno de la planta, personal del área de ingeniería, ingeniero de performance, ingeniero de operaciones y personal de operaciones, se tienen los siguientes puntos importantes:

1. El vacío de la planta depende principalmente de dos factores: la temperatura del agua de circulación que enfría el condensador, y la correcta extracción de los gases no condensables. La temperatura de agua de circulación, a su vez, depende de su correcto enfriamiento en la torre de refrigeración, donde afectan las variables de la temperatura ambiente, la cantidad de ventiladores en operación, y el rendimiento en general de la torre.
2. Un número mayor de infiltraciones de aire en el condensador implica en que debe extraerse una mayor cantidad de este mismo. Se presume que esta es la situación, y por ende, se supera la condición de diseño de operar con solo una bomba de vacío, y se pasa a operar con dos, perdiendo la garantía de tener un equipo de repuesto.
3. El principal parámetro de control para la operación del condensador y del sistema de extracción de los gases no condensables para obtener el mayor rendimiento es mantener al condensador trabajando en su presión de diseño, la cual corresponde a 35 mmHg. Dicha presión no puede ser alcanzada en días de altas temperaturas ambientales debido a que los 12 ventiladores de la TTRR no tienen la capacidad de enfriar lo suficiente. Por otro lado, la potencia entregada por la planta está relacionada a lo que el Coordinador Eléctrico Nacional solicita. Si la planta opera en su máxima potencia, utilizando todos los equipos para lograr esto, es complejo también mantener la correcta presión.
4. Es común que la planta se encuentre en estado mínimo técnico, es decir, no está entregando electricidad al sistema, por lo que opera con los equipos produciendo el menor trabajo posible sin sufrir daños. En dicho estado, no es prioridad mantener el condensador operando a la presión de diseño, ya que no se está esperando tener el mejor rendimiento en la planta. Aún así, se debe mantener la presión dentro de los rangos de trabajo del condensador, para no dañarlo. Como se quiere controlar la presión, se debe decidir entre enfriar más el agua, o activar más bombas de vacío. La potencia consumida por un ventilador de la torre de refrigeración es considerablemente mayor a la potencia consumida por el sistema de extracción de gases. Lo anterior, produce que se prefiera siempre activar ambas bombas de vacío para encender la menor cantidad de ventiladores posible, y así, ahorrar electricidad.
5. Para controlar correctamente la bomba, algunos de sus parámetros operacionales deben ser monitoreados y manipulados desde la sala de control. La compañía Nash ofrece su bomba con un panel de control local, donde se le entrega a sala de control la información y manejo mínimo. Por lo anterior, desde sala de control pueden monitorear el estado encendido, apagado, y automático de la bomba, y la única variable conocida es si la bomba está encendida o no. Un parámetro crítico en la bomba de vacío es mantener el agua de sello.

Una de las hipótesis que se tenía era que lograr operar las bombas de vacío a su máxima eficiencia lograría tener un control correcto de la presión en el condensador. Con los puntos previamente expuestos, se evidencia que existen más problemas a abarcar para el correcto vacío, los cuales son las infiltraciones en el condensador, la temperatura de agua de enfriamiento y el correcto funcionamiento del sistema de extracción de gases no condensables.

Con lo postulado anteriormente, el trabajo debe partir por lo siguiente:

- Se debe evaluar el rendimiento del condensador, y cuantificar las infiltraciones de este mismo, con el fin de determinar si se requieren más bombas de vacío, cambio de tecnología, u otra solución.

5.8. Rendimiento condensador

Primeramente, se utilizan datos de diseño para lograr encontrar el coeficiente total de transferencia de calor del condensador.

- T_{sat} : La presión de diseño es 35 mmHg, con lo cual, a partir de las tablas de vapor [2], la temperatura saturada del vapor de diseño es de 31,7 °C. Esta temperatura corresponde conforme la memoria de cálculo a las temperaturas T_e y T_s .
- \dot{Q} : El valor de diseño del calor neto extraído del agua de circulación es 275446667 W.
- t_e : El valor de diseño de la temperatura de entrada del agua de enfriamiento del condensador es de 18 °C.
- t_s : El valor de diseño de la temperatura de salida del agua de enfriamiento del condensador es de 26 °C.
- A_s : El valor de diseño del área de intercambio del condensador se calcula con la ecuación 3.5, y con los siguientes datos:
 - D_{ext} : 0,03175 m.
 - L : 9,982 m de largo efectivo.
 - N : 9572 tubos.

Con lo anterior, el área de intercambio es 9530 m^2 .

De las temperaturas se puede obtener la temperatura representativa con las ecuaciones 3.1 y 3.2, donde para un condensador se modela en contraflujo y factor de corrección $F = 1$.

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &= T_{sat} - t_e = 13,7 \\ \Delta T_2 &= T_{sat} - t_s = 5,7 \\ \Delta T_{log} &= \frac{13,7 - 5,7}{\ln(13,7/5,7)} = 9,12\end{aligned}$$

Con todos los datos anteriores, con la ecuación 3.4 se obtiene el valor del coeficiente total de transferencia de calor del condensador.

$$U = \frac{275446667}{9530 \cdot 9,12} = 3168 \quad \left(\frac{W}{m^2K} \right)$$

A partir de la información de sala de control se extraen datos cada 1 hora durante un año, partiendo el 01 de mayo del 2023, hasta el 30 de mayo del 2024 de las siguientes señales:

- Potencia producida por la planta en MW, donde el valor de diseño es 379 MW, sumando las potencias de las turbinas a gas y a vapor.

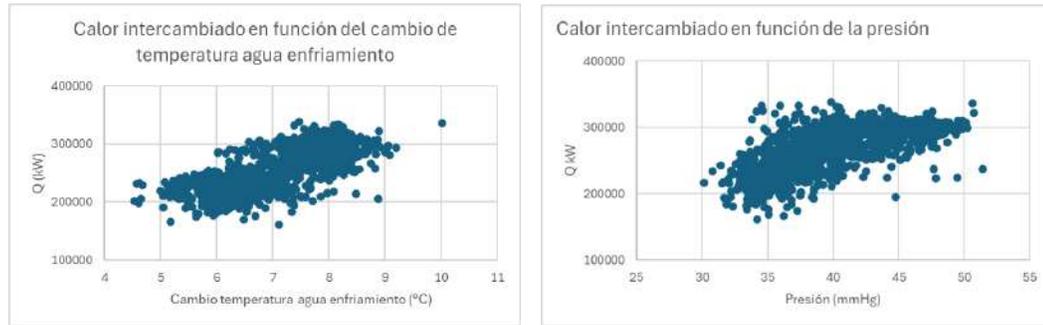
- Presión al interior del condensador en mmHg.
- Temperatura de entrada del agua de enfriamiento del condensador.
- Temperatura de salida del agua de enfriamiento del condensador.

Los datos se filtran para potencias mayores a 200 MW, con lo cual se obtienen 1417 registros para analizar. Dicho filtro es realizado para trabajar con valores cuando la planta está operativa. Es necesario obtener la temperatura del vapor de agua, por lo que se asume que el vapor de agua dentro del condensador se encuentra saturado, y para cada presión se encuentran los valores de temperatura, volumen específico del vapor, volumen específico del líquido. Todo lo anterior se realiza con los datos de las tablas de vapor [2]. También se calcula la relación de volumen entre vapor y líquido, dividiendo el volumen específico del vapor por el volumen específico del líquido.

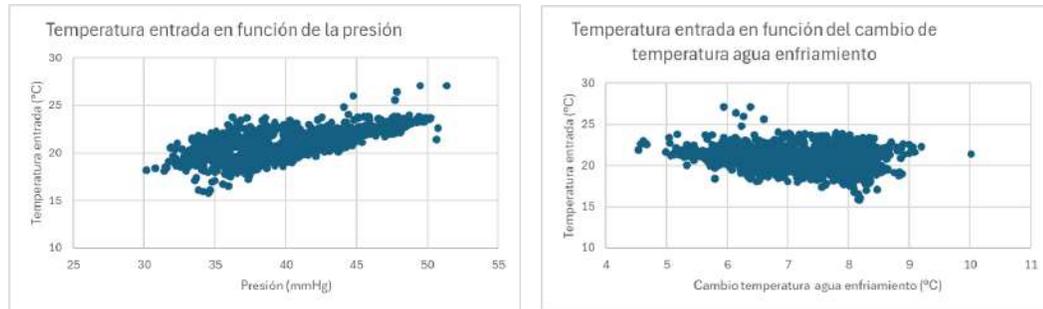
Por otro lado, con los datos de temperatura de saturación del vapor, y las temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento se procede a calcular la temperatura representativa con la ecuaciones 3.1 y 3.2, donde para un condensador se trabaja con el modelo de un intercambiador de calor en contraflujo con factor de corrección 1.

Con el valor de la temperatura representativa en los diferentes registros, se calcula el calor intercambiado en el condensador con la ecuación 3.3, utilizando el coeficiente total de transferencia de calor calculado con los datos de diseño, y el área de intercambio previamente calculada.

A partir del calor intercambiado y las temperaturas del agua de enfriamiento se obtienen los gráficos de la figura 5.7.



(a) Calor intercambiado en función del cambio de temperatura agua enfriamiento (b) Calor intercambiado en función de la presión



(c) Temperatura entrada agua de enfriamiento en función de la presión (d) Temperatura entrada en función del cambio de temperatura agua de enfriamiento

Figura 5.7: Comparación variables condensador

Se puede apreciar en la figura 5.7.a un comportamiento creciente, por lo que se puede deducir que ante una mayor variación de temperatura en el agua de enfriamiento, se logra un mayor intercambio de calor en el condensador. La pendiente de la figura 5.7.b también es positiva, y nos permite ver la tendencia de que se requiere intercambiar una mayor cantidad de calor cuando el condensador está operando a mayores presiones.

Por otro lado, la figura 5.7.c se aprecia que se tiene un comportamiento creciente nuevamente, lo que nos evidencia que se logra trabajar con una presión menor en el condensador cuando se logran menores temperaturas de entrada del agua de enfriamiento. Finalmente, en la figura 5.7.d se evidencia que si bien no existe una relación clara entre la temperatura de entrada y el cambio de temperatura en el agua de enfriamiento, si se logra apreciar levemente que ante una menor temperatura de entrada se encuentran valores más altos de cambio de temperatura.

Los gráficos de la figura 5.7, y en especial la figura 5.7.c, permiten validar el postulado de que la presión del condensador depende de la temperatura del agua de circulación, donde con una entrada de agua de circulación con temperaturas menores se logran alcanzar presiones menores, e incluso alcanzar la condición de diseño del condensador en 35 mmHg.

Por otro lado, también se calcula la eficiencia del condensador con la ecuación 3.6. A partir de este cálculo se generan los gráficos de la figura 5.8.

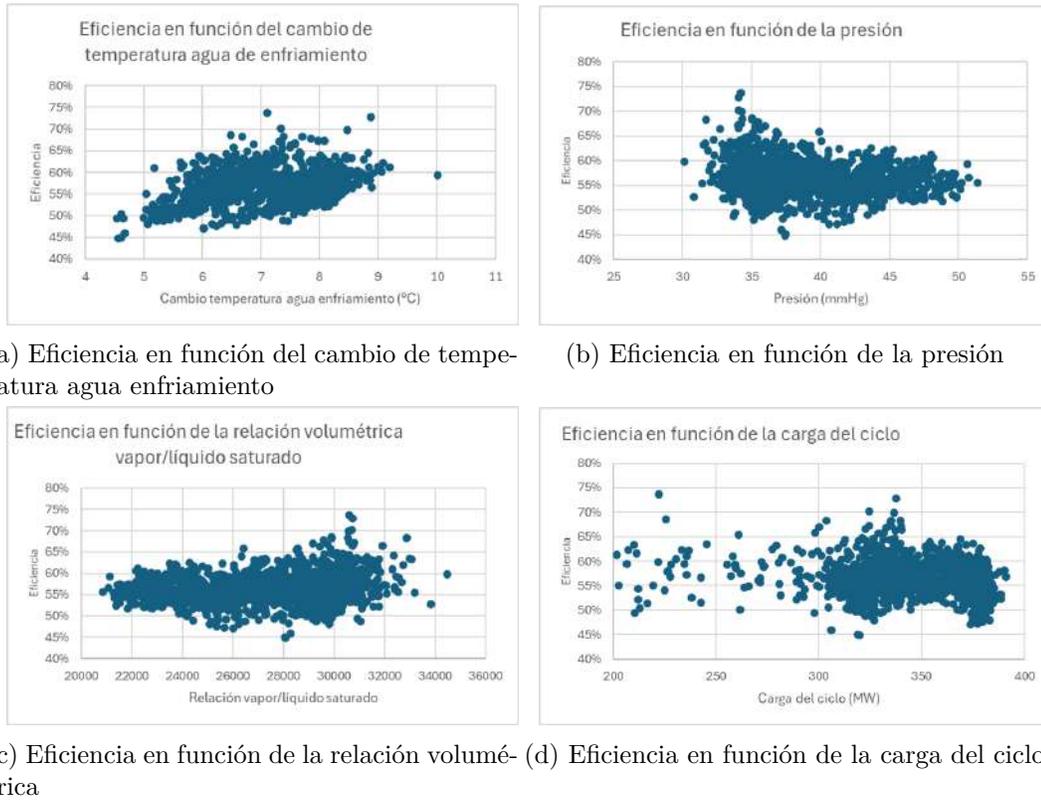


Figura 5.8: Comparación de variables con la eficiencia del condensador

Se puede apreciar en la figura 5.8 que para los cuatro gráficos la pendiente es pequeña, lo que permite comprender que la eficiencia del condensador no es afectada por los parámetros de temperatura del agua de enfriamiento, presión de funcionamiento del condensador, relación volumétrica y carga del ciclo. El valor promedio de la eficiencia en los datos medidos es de 56 %, mientras que si este cálculo se realiza con los datos teóricos se obtiene una eficiencia de 58 %.

5.9. Infiltraciones condensador

Durante la jornada nocturna del viernes 5 de abril del 2024, en proceso de detención de la planta, y con ambas turbinas funcionando en 50 Hz pero sin carga, se realizó una prueba programada para medir las pérdidas en el condensador principal. Dichas pruebas fueron efectuadas por el área de ingeniería de la planta, quienes entregan el gráfico de la figura 5.9, donde las líneas naranja y gris indican si la bomba está encendida o apagada, en las que el valor cero corresponde a que la bomba está apagada. La curva azul corresponde a la presión en el interior del condensador, medida en mmHg indicada en el eje vertical izquierdo.

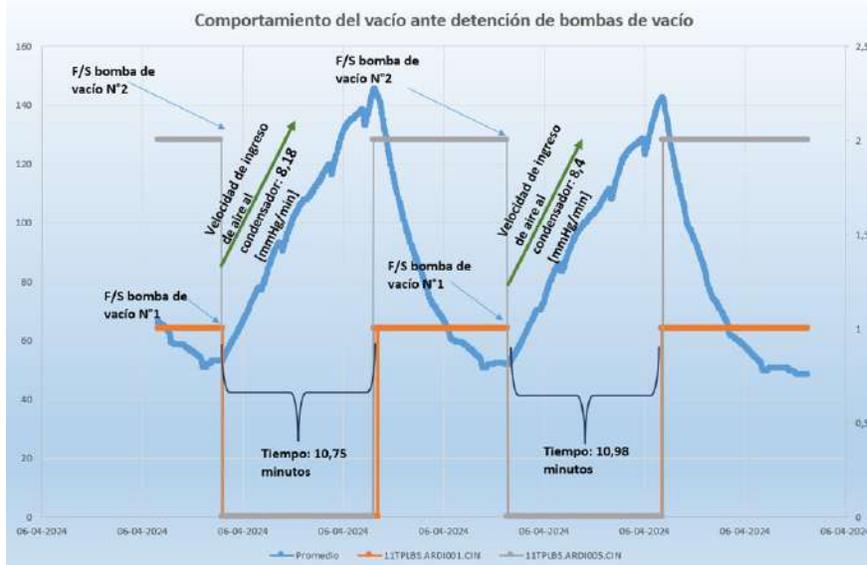


Figura 5.9: Resultados prueba de vacío en condensador

Además, el área de ingeniería entrega los siguientes resultados:

- Vacío inicial promedio: 52 mmHg.
- Vacío final promedio: 141 mmHg.
- Duración total de las pruebas: 55 min.
- Tasa de variación de presión en primera prueba: 8,18 mmHg/min o 490,8 mmHg/h.
- Tasa de variación de presión en segunda prueba: 8,4 mmHg/min o 504 mmHg/h.
- Flujo de infiltraciones en el condensador 2024: 162 m³/h.
- Flujo de infiltraciones en el condensador 2023: 156 m³/h.

Con el fin de comparar estos resultados, se realizan los cálculos nuevamente, basándose en los datos de tasa de variación de presión en las pruebas. Para los cálculos se asume que al principio del experimento el condensador contiene únicamente vapor de agua. Luego, al apagar ambas bombas de vacío, el condensador comienza a aumentar su presión con el aire que ingresa. Considerando la ley de presión parcial de Dalton, y la ecuación 3.8, se puede encontrar que la presión parcial del aire es la diferencia entre la presión final (presión de aire más vapor) y la presión inicial (presión solo del vapor de agua). Con lo anterior, si se divide en el tiempo, podemos encontrar que la tasa de variación de presión es equivalente a la ecuación 5.1.

$$\dot{P} = \frac{P_{cond} - P_{H_2O}}{t} \quad \left(\frac{mmHg}{h} \right) \quad (5.1)$$

Luego, la ecuación 3.13 puede ser reescrita como la ecuación 5.2.

$$\dot{V} = \frac{\dot{P} \cdot V_{vapor} \cdot T_{est}}{T_{cond} \cdot P_{est}} \quad \left(\frac{Sm^3}{h} \right) \quad (5.2)$$

Utilizando los siguientes datos se puede obtener el caudal volumétrico de infiltraciones en el condensador:

- \dot{P} : 490,8 mmHg/h para la prueba 1, y 504 mmHg/h para la prueba 2.
- V_{vapor} : Se obtiene con la ecuación 3.7, con los datos de masa y volumen de los antecedentes y utilizando la densidad del agua como 997 kg/m^3 .

$$V_{vapor} = \frac{507570 - 177355}{997} - 36,9 = 294,3 \quad (\text{m}^3)$$

- T_{est} : 288 K.
- T_{cond} : Se busca la temperatura del agua conforme la presión al interior. Por la figura 2.1.a se aprecia que ante una presión variable, la temperatura de condensación también lo es, por lo que se aproxima a la presión media, de 100 mmHg en la figura 5.9. A partir de las tablas de vapor [2], dicha presión equivale aproximadamente a la temperatura 325 K.
- P_{est} : 760 mmHg.

Finalmente, se obtienen dos valores para el caudal volumétrico de infiltraciones, expuestos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Caudal volumétrico de infiltraciones en el condensador

Pruebas	$\dot{V} \left(\frac{\text{Sm}^3}{\text{h}} \right)$
Prueba 1	168,42
Prueba 2	172,94
Promedio	170,68

Se puede apreciar que el valor calculado promedio es un 5,4% mayor al valor calculado por el área de ingeniería, por lo que es un valor bastante cercano, y que puede diferir por diferencias en algún parámetro.

Por otro lado, en mediciones realizadas a la bomba, observando los indicadores FT001 y FT021 del plano P&ID de la figura 5.6, se encuentra que la bomba A extrae un flujo de 10 SCFM o $16,99 \text{ Sm}^3/\text{h}$, y la bomba B 25 SCFM o $42,48 \text{ Sm}^3/\text{h}$. Lo anterior entrega un total de $59,47 \text{ Sm}^3/\text{h}$, lo que evidentemente es insuficiente ante las infiltraciones del condensador.

El hecho de utilizar dos bombas de vacío en operación, induce a la idea de que se requiere comprar una tercera bomba de vacío de las mismas características, o cambiar las dos presentes por una más grande, o por alguna tecnología similar, como eyectores. Dicha idea es descartada, pues el hecho de la utilización de más bombas de vacío esta relacionado con que existen altas infiltraciones, incrementando en comparación al año 2023, así que el problema a solucionar es reparar las infiltraciones, para volver lo más cerca posible a la condición de diseño de la planta, donde una bomba de vacío es suficiente.

5.9.1. Solución a las infiltraciones

Dado que se sabe que las infiltraciones están en valores altos, es necesario contrarrestar esto, solucionando los puntos donde se generan. Por el tamaño de la planta, resulta complejo identificarlas, y además, las cañerías suelen estar revestidas por aislación, por lo que no se pueden encontrar con las inspecciones visuales las infiltraciones hasta que son considerablemente grandes. Por lo anterior, la empresa ha contratado un servicio de detección de infiltraciones de manera anual, que utiliza un espectrómetro de masas modelo ADIXEN ASM 310 expuesto en la figura 5.10.



Figura 5.10: ADIXEN ASM 310 [13]

En la figura 5.11 se puede apreciar el proceso de detección de fugas.

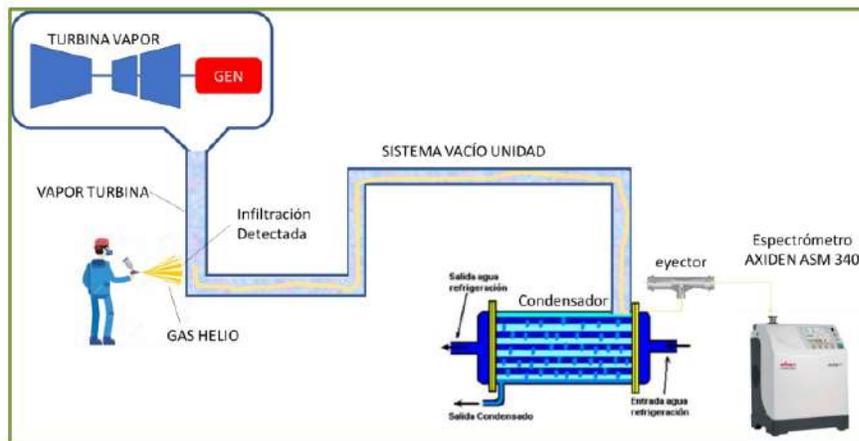


Figura 5.11: Diagrama proceso de detección de fugas [13]

En la figura 5.11, se puede apreciar la configuración del servicio para la detección de fugas, donde se debe destacar que de manera normal el circuito de cañerías analizado no opera con gas helio en su interior. Además, es necesario que el circuito a analizar se encuentre en funcionamiento. El servicio de detección de infiltraciones cuenta con los siguientes pasos.

1. Instalación de circuito para la recepción de la muestra de gases de salida en el espectrómetro.

2. Un trabajador rocía el punto a inspeccionar con gas helio durante 2 a 3 segundos.
3. Paralelo al primer paso, un segundo trabajador es informado del momento en el cual fue rociado el gas helio, y verifica en el espectrómetro la lectura de helio, junto con su magnitud presente.
4. Los pasos 2 y 3 se repiten para todos los puntos de interés.

Con los pasos anteriores, si no se detecta helio significa que en el punto seleccionado no hay infiltraciones, por otro lado, si se detecta helio significa que existen infiltraciones, y conforme la magnitud medida de helio se puede determinar el tamaño de la infiltración. Con lo anterior, el espectrómetro puede detectar infiltraciones en tuberías, flanges, válvulas y elementos de las tuberías, que afectan a las infiltraciones totales del condensador, y por consecuencia, el uso de las dos bombas de vacío.

Los informes proporcionados por el servicio [13] indican que tiempo de detección es variable, indicando en el reporte del 2023 que el promedio de tiempo desde el rocío del helio hasta la detección por el equipo es en promedio 5 minutos. En el año 2023 el reporte indica que se encontraron 83 puntos con infiltración, de los cuales uno es clasificado con magnitud “grande”, mientras que los demás son clasificados con magnitud “pequeña” o “muy pequeña”. Las infiltraciones se atribuyen a fatiga de los materiales producto de las temperaturas de trabajo, y de los años de operación.

La central Nueva Renca tiene planificado para septiembre del año 2024 una inspección mayor, la cual se realiza cada 7 años aproximadamente y se efectúan mantenimientos importantes en las maquinarias, donde incluso se desarman las turbinas. Esta es una oportunidad idónea para que el personal de la planta identifique con este equipo las infiltraciones, y se corrijan, mejorando así el funcionamiento del condensador.

5.10. Mejora en cañerías LV007 y LV009

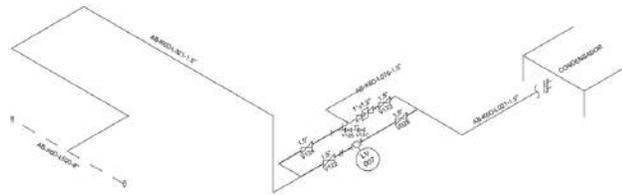
Dentro de los puntos detectados por el servicio de detección de fugas [13], se encontraron 3 puntos de infiltraciones en dos líneas de cañerías que ingresan al condensador, donde una cañería cuenta con la válvula LV007 y la otra con la válvula LV009. En base a lo anterior, en diciembre del 2023 se realiza en la planta mediante un servicio externo un ensayo de identificación positiva de los materiales por técnica analítica de fluorescencia de rayos X. El ensayo permite determinar el material de la cañería. La prueba se realiza acercando el equipo X-50 XRF a los puntos seleccionados, tal como se expone en la figura 5.12.



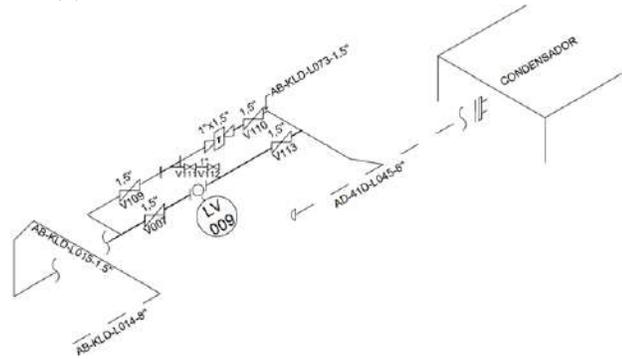
Figura 5.12: Prueba identificación de material

Luego de los ensayos, la empresa reporta que el material identificado es acero carbono, donde no se puede identificar completamente su composición ya que la técnica ensayada es aplicable a acero con aleación [14].

El material encontrado es diferente al material de diseño, por lo que se hace un levantamiento de la cantidad de elementos requeridos para el cambio de la línea. Primeramente se generan los planos isométricos de la figura 5.13.



(a) Plano Isométrico línea con válvula LV007



(b) Plano Isométrico línea con válvula LV009

Figura 5.13: Planos isométricos

Posterior a esto, con la información de terreno del largo de las cañerías, cantidad de elementos de cañerías, los materiales en el diseño estándar por ingeniería 3DSG-M46-001 y el listado de líneas 3DS-M46-005 se determina que se debe disponer de los elementos de las tablas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8.

Tabla 5.3: Tuberías a comprar

Línea	Material	Diámetro	Cédula	Cantidad (m)	Cantidad (tiras de 6 m)
LV007	ASTM A 335 GR. P22, SEAMLESS	1,5"	SCH 80	16,85	4
LV009	ASTM A 335 GR. P22, SEAMLESS	1,5"	SCH 160	8,15	2

Tabla 5.4: Bridas a comprar

Línea	Material	Tipo	Diámetro	Clase	Cédula	Cantidad
LV007	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5"	600	SCH 80	4
LV009	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5"	2500	SCH 160	4

Tabla 5.5: Codos a comprar

Línea	Material	Tipo	Diámetro	Clase	Cédula	Cantidad 90°-45°
LV007	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5"	3000	SCH 80	10-0
LV009	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5"	6000	SCH 160	6-6

Tabla 5.6: Tee a comprar

Línea	Material	Tipo	Diámetro	Clase	Cédula	Cantidad
LV007	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5x1,5x1,5	3000	SCH 80	4
LV009	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5x1,5x1,5	6000	SCH 160	4

Tabla 5.7: Sockolet a comprar

Línea	Material	Tipo	Diámetro	Clase	Cédula	Cantidad
LV007	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5x1,5	3000	SCH 80	3
LV009	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	6x1,5	6000	SCH 160	2

Tabla 5.8: Coplas a comprar

Línea	Material	Tipo	Diámetro	Clase	Cédula	Cantidad
LV007	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5	3000	SCH 80	6
LV009	ASTM A 182 gr F22	SOCKET WELDING	1,5	6000	SCH 160	6

5.11. Control de la bomba

En base a lo conversado con el personal de control de la planta, es un problema no tener un control más exhaustivo de los parámetros de la bomba de vacío. El nivel de agua en el separador del sistema de extracción de aire es muy importante, ya que si este nivel decae lo suficiente, la bomba perderá el agua de su sello, y dejará de ser efectiva. Ha ocurrido en la planta que la bomba se detiene por falta de agua u otro motivo, y las válvulas PV001 y PV021 del P&ID de la figura 5.6 no se cierran automáticamente, luego el condensador comienza a acumular aire en su interior debido a las infiltraciones y se provoca la detención de la planta. Si bien el panel de control del sistema de extracción de vacío proporciona una alarma de nivel bajo de agua de sello, esta alarma se ve únicamente de manera local, por lo que el operador de terreno que está realizando una ronda debe transitar por el sector para identificarla. Lo anterior es un riesgo muy grande, por lo que se quiere evitar este problema simplificando el control del nivel del agua del separador, de manera que siempre este con un nivel alto.

Tal como se ve en el plano de la figura 5.6, existen dos caminos para la reposición de agua de sello en el separador. La predeterminada por el fabricante es recorriendo el circuito de la válvula solenoide SV002 y SV022 para las bombas A y B respectivamente. La válvula solenoide está conectada a los interruptores de nivel o LS del separador, y se encarga de realizar el correcto control de nivel de agua en el separador, donde se abre y se cierra constantemente. El otro camino es entrar por la válvula de globo V041 y V084 para las bombas A y B respectivamente. Dichas válvulas son manuales. Dado que el personal desconfía de la válvula solenoide para mantener un correcto nivel de agua debido a que ya se ha presentado este problema, la solución y situación actual es mantener siempre abierta la válvula de globo. Lo anterior genera que el drenaje del separador esté constantemente desperdiciando agua. Las hipótesis que se tienen es que la válvula solenoide tiene una respuesta muy lenta para proveer de agua al separador, o que está operando incorrectamente. Por ello es necesaria su revisión.

Además, la lógica de control desde sala de control es ínfima, donde se limita al encendido y apagado, que están relacionados a la apertura y cierre de las válvulas de admisión de aire desde el condensador PV001 y PV021, y al modo automático, donde se le da completo control a la bomba, sin conocer nada de esta desde sala de control. Por todo lo anterior, existe una oportunidad de mejora importante en el control de la bomba, la cual se evaluará y se efectuará.

Inicialmente, se realiza una inspección en terreno acompañado del equipo de instrumentación, con el fin de verificar visualmente si existen las conexiones eléctricas de los componentes

del sistema de extracción hacia sala de control. En terreno se encuentra lo expuesto en las figuras 5.14.

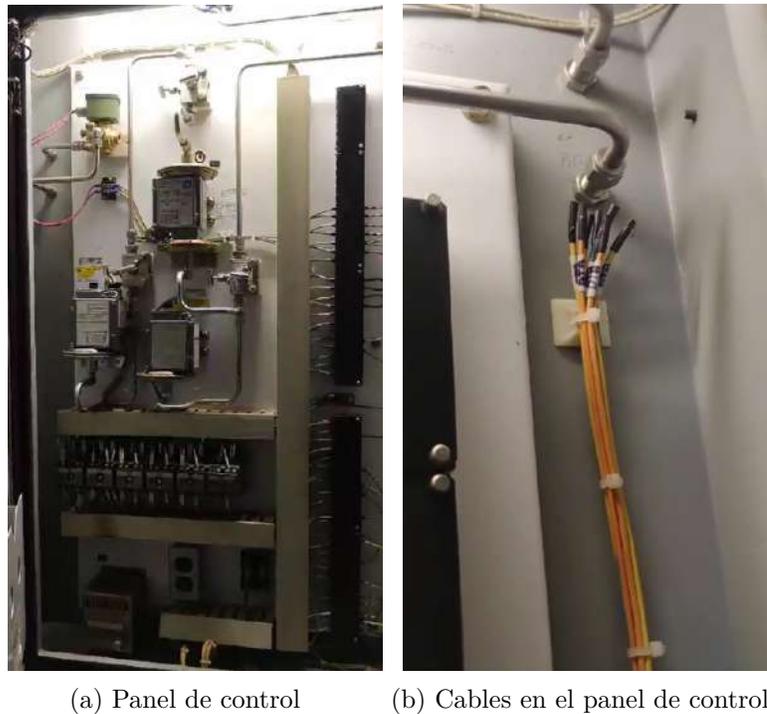


Figura 5.14: Conexión entre etapas

En terreno, tras abrir el panel de control de las bombas, se encuentra que los cables se encuentran desconectados hacia sala de control, tal como se expone en la figura 5.14.b. Por lo anterior, se debe evaluar el estado de las conexiones, enviar la información a sala de control, y cambiar el sistema de visualización de sala de control para poder visualizar esta información.

También, se asiste a sala de control para visualizar el sistema de control distribuido DCS, donde el sistema de extracción de aire se controla con la interfaz de la figura 5.15.

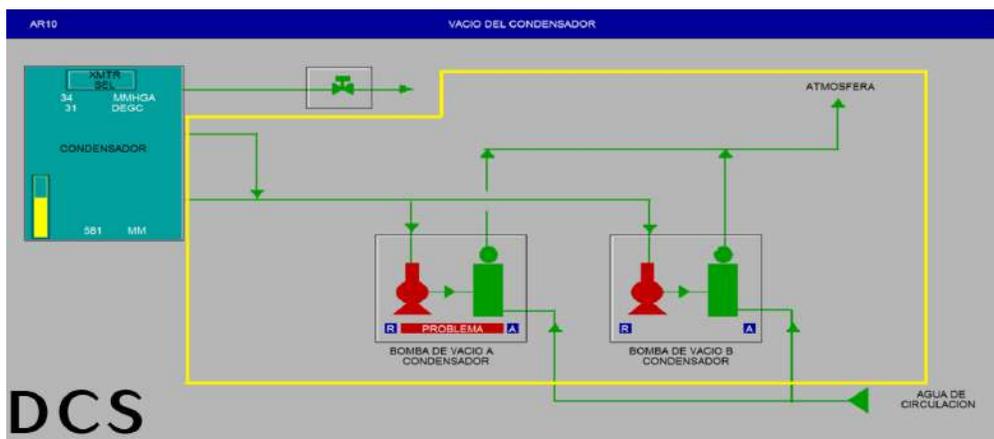


Figura 5.15: Interfaz de control sistema de extracción de aire

En la figura 5.15, se encierra en amarillo todo lo relativo al sistema de extracción de aire.

El espacio encerrado es el mismo espacio que contempla el plano P&ID de la figura 5.6. Se puede apreciar inmediatamente que la diferencia de información es considerablemente grande. Desde el sistema de control solo se pueden seleccionar los dos cuadros de borde negro relacionados a las bombas de vacío, donde están los comandos encendido, apagado y modo automático. En cuanto a la simbología, el símbolo rojo es la bomba, y el verde el separador junto al silenciador.

Para la realización de cualquier trabajo en la planta se debe generar una llamada de servicio en el software SAP, que corresponde a la plataforma que permite la comunicación entre diferentes áreas de la planta, control de mantenimientos, gastos, y otros usos. La llamada de servicio actúa como un aviso de una problemática o posible mejora, que luego es atendida por el personal de la planta. Dado que el objetivo es mejorar la información que se recibe del sistema en sala de control, y por otro lado, ver el estado de las válvulas solenoides en la entrada del agua de sello, se crean las siguientes llamadas de servicio con el apoyo del área de instrumentación:

- Contrastación y verificación de lazo flujómetro AR-FT001.
- Contrastación y verificación de lazo flujómetro AR-FT021.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS001.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS002.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS003.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS021.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS022.
- Chequeo, calibración y verificación de lazo interruptor de presión AR-PS023.
- Inspección y mantenimiento válvula solenoide AR-SV002 reposición de agua separador de la bomba de vacío A.
- Inspección y mantenimiento válvula solenoide AR-SV022 reposición de agua separador de la bomba de vacío B.

En junio, durante una detención de la planta, se efectúan los trabajos mencionados.

5.11.1. Flujómetros

Para la revisión de los flujómetros, inicialmente se deben instalar andamios debido a la altura en la que se encuentran. Los flujómetros se exponen en la figura 5.16.



Figura 5.16: Flujómetros en terreno

En la figura 5.16 se aprecia que ambos flujómetros están conectados a una caja, la cual no corresponde al panel de control de las bombas. Desde sala de control se informa que se implementó este equipo como mejora para el control del flujo de extracción de gases no condensables, donde anteriormente se medía con el rotámetro instalado en el separador, con la codificación FI002 y FI022 en el plano P&ID. El flujómetro es capaz de medir temperatura y caudal, donde el caudal lo entrega en la unidad de medida SCFM. Los datos medidos los expone en una pantalla digital y se pueden visualizar en terreno, la información no se entrega a sala de control. Los andamios instalados para los trabajos en los flujómetros se exponen en la figura 5.17.



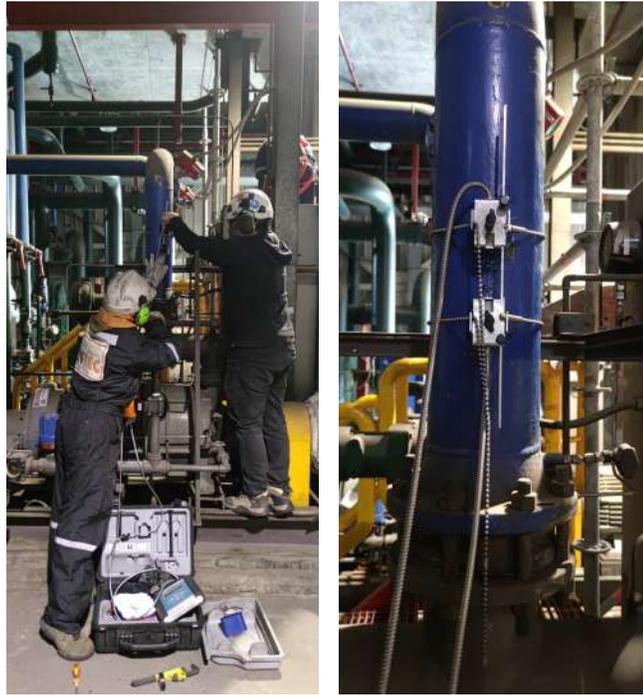
(a) Instalación andamios



(b) Instalación andamios vista lateral

Figura 5.17: Andamios para flujómetros

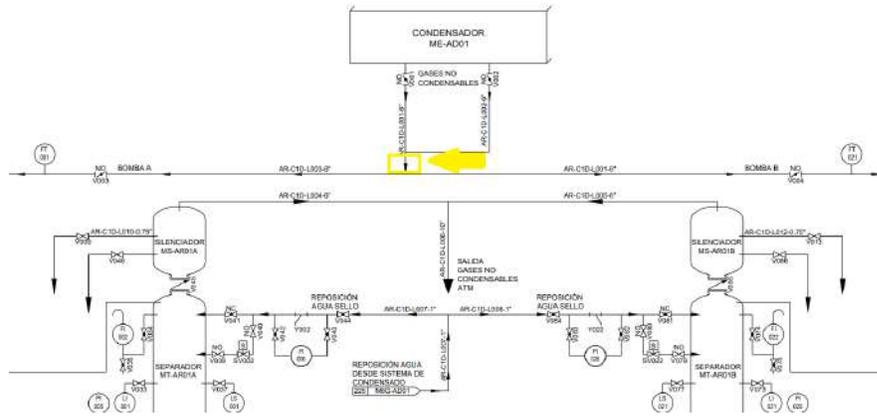
Con los andamios instalados, se efectúa una revisión en las conexiones del flujómetro, y se realiza un cambio de configuración para que el caudal medido se mida en Sm^3/h . Se debe comprobar que el caudal medido por el flujómetro sea el correcto, por lo que se procede a instalar un equipo que utiliza el ultrasonido para la medición del caudal. La instalación y el equipo se expone en la figura 5.18, y es realizada en la admisión de las bombas.



(a) Instalación de equipo ultrasonido (b) Equipo de medición instalado

Figura 5.18: Equipo de medición de caudal con ultrasonido

Los resultados de estas pruebas son insatisfactorios, ya que se reporta que la medición del caudal no es certera debido a que tanto los flujómetros como el equipo ultrasónico se instalaron en zonas cercanas a curvas de las cañerías, lo que genera un flujo no desarrollado. En la figura 5.18.a se aprecia la curva en la línea AR-C1D-L003-6” del plano P&ID, antes de la admisión de la bomba A, mientras que en la figura 5.16 se aprecia la curva de la línea AR-C1D-L001-6” del plano P&ID, al producirse la división de la cañería para ingresar a ambas bombas. Para la medición del flujo, se recomienda la instalación del equipo ultrasónico y de un flujómetro en la zona señalada por la figura 5.19, y que corresponde a un tramo de cañería largo, que permitiría el desarrollo del flujo total de ambas bombas, logrando una medición más confiable. Para la medición de los flujos por separado se pueden seguir utilizando los flujómetros actuales junto con los rotámetros del separador. Cabe destacar que el flujo medido antes de entrar a la bomba es diferente al medido en el rotámetro, ya que al ingresar a la bomba el flujo viene mezclado con vapor de agua, mientras que al salir de la bomba en el separador, al flujo se le quitó la mayor cantidad de vapor de agua posible.



(a) Ubicación P&ID



(b) Ubicación en terreno

Figura 5.19: Ubicación nueva para la medición de caudal

5.11.2. Interruptores de presión

Los interruptores de presión se miden y se constrostran sus datos de calibración con los proporcionados en el manual de la bomba. En terreno se encuentra que los interruptores cuentan con una nota que indica datos de calibración de parámetros. Los parámetros medidos difieren de los proporcionados por el manual de la bomba, así como los parámetros en la nota en terreno también difieren de los proporcionados en el manual. Esto se debe a que los interruptores de presión se han cambiado durante la vida de la planta, generando este conflicto. El equipo de instrumentación de la planta se encargara de definir correctamente los parámetros a utilizar, y posteriormente calibrar los interruptores. Una foto de los interruptores de presión se aprecia en la figura 5.14.a.

5.11.3. Válvula solenoide para la reposición de agua

Las válvulas solenoides SV002 y SV022 son removidas de su posición, para verificar su funcionamiento. En la imagen 5.20 se pueden apreciar las válvulas en terreno.



(a) SV002 en bomba A (b) SV022 en bomba B

Figura 5.20: Válvulas solenoides para la reposición de agua

Primeramente, se miran los interruptores de nivel LS001 y LS021 con el fin de ver que esté en correcto estado la conexión con la válvula solenoide. Estos interruptores se encuentran en buen estado durante el momento de la inspección, ya que ya habían sido mantenidos. El procedimiento para la revisión es desatornillar la tapa para lograr ver las conexiones, tal como se expone en la figura 5.21.



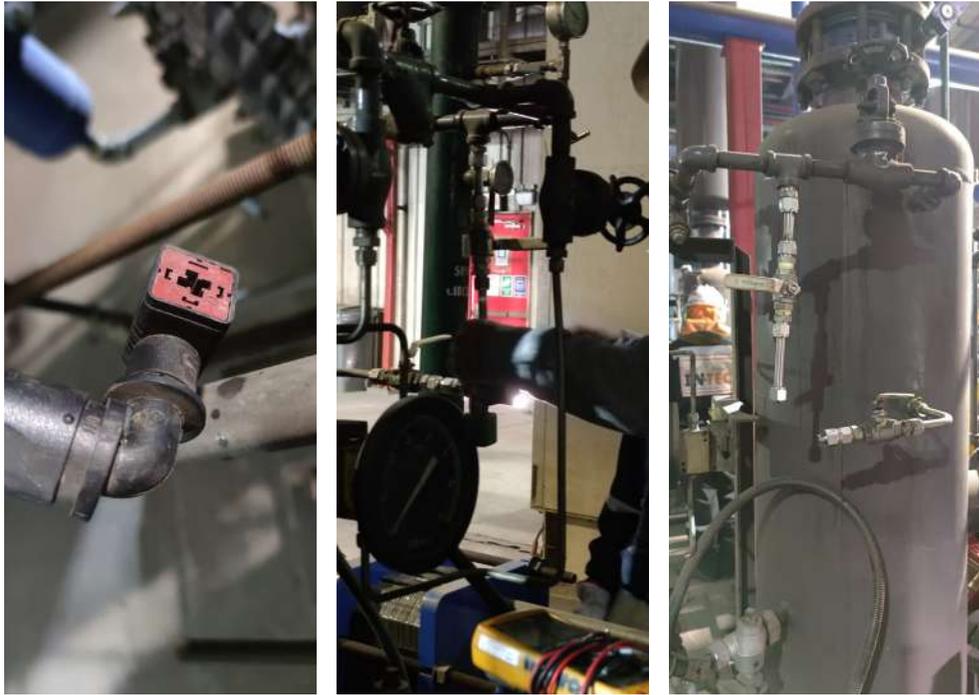
(a) Interruptor de nivel tapado

(b) Extracción de tapa

(c) Interruptor de nivel destapado

Figura 5.21: Interruptor de nivel

Luego, para la extracción de las válvulas solenoides, se cierran las válvulas V039 y V040 para la bomba A, y V079 y V080 para la bomba B. Un operador de terreno realiza esta acción, y luego abre la válvula 041 y 081 para las bombas A y B, mirando el nivel de los indicadores de nivel LI001 y LI021, con el fin de que el separador no se seque durante este mantenimiento. Al asegurar el correcto nivel de agua en el separador, se procede a extraer las válvulas, desconectando la conexión eléctrica de sus actuadores manualmente, y soltando con herramientas sus conexiones a las cañerías. La conexión eléctrica junto con la extracción de la válvula y el estado final del sector se exponen en la figura 5.22.



(a) Conexión actuador (b) Extracción de la válvula (c) Instalación sin válvula solenoide

Figura 5.22: Extracción válvula solenoide

Las dos válvulas extraídas son llevadas al taller para realizarles pruebas de funcionamiento. En la figura 5.23 se exponen ambas válvulas solenoide, una con actuador y otra sin actuador.



Figura 5.23: Válvulas solenoide

El actuador se conecta eléctricamente a una fuente regulada variable, la que se ajusta en 110 V. La conexión se expone en la figura 5.24.



Figura 5.24: Conexión actuador y fuente regulada

Luego se procede a encender y apagar la fuente de energía para energizar el actuador. Este último, cuenta con dos estados, abierto y cerrado, y cambia al recibir o no recibir energía eléctrica. La válvula es normalmente cerrada, por lo que está cerrada al estar sin energía. Al realizar la prueba el actuador funcionó, sin embargo, al probar el paso de aire por la válvula en estado abierto, la válvula no permitió el flujo por su interior. Al cambiar el estado del actuador en reiteradas ocasiones, la válvula no cambio su estado, por lo que se desarma para encontrar el problema. Primeramente, se extrae la conexión que conecta al actuador con la bomba, donde el estado de la válvula se muestra en la figura 5.25.



Figura 5.25: Válvula solenoide destapada

El técnico encargado de la revisión menciona con respecto al estado de la válvula en la figura 5.25 que se encuentra sucia con corrosión y que es necesario desarmar y limpiar componente por componente, ya que la suciedad hace que esté trabada. En la figura 5.26 se aprecia la válvula desarmada posterior de una primera limpieza de cada componente.



(a) Piezas de la válvula

(b) Cuerpo válvula

Figura 5.26: Válvula solenoide desarmada

Luego de limpiar los componentes de la válvula, se vuelve a armar y probar con la fuente regulada. Al realizar la prueba la válvula logra operar correctamente.

Si bien esta inspección fue productiva ya que se logró restaurar el estado de la válvula solenoide, el problema de desconfianza con la válvula sigue presente, debido a su lenta respuesta, y a su falta de control desde sala de control. Por lo anterior, la solución escogida es reemplazar la válvula por una válvula de bola con actuador, de modo que la sección de paso del agua sea más rápida, y asimismo, la reposición de agua en el separador. Además, el estado de la válvula junto con el nivel del separador deben ser reportados a salas de control y visualizados en el sistema de control distribuido, con el fin de controlar de mejor manera el nivel del separador y no desperdiciar agua.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo general del trabajo fue mejorar el sistema de extracción de aire y analizar el problema de pérdida de vacío en el ciclo de potencia de la central Nueva Renca. Para cumplirlo, fue necesario adquirir un conocimiento teórico general de la planta, y especializado en el sistema a estudiar junto con los sistemas cercanos que pueden ser afectados, como lo son la torre de refrigeración, el condensador y la turbina de vapor. Fue de gran valor el conocimiento teórico y relacionado al comportamiento histórico de la planta, que fue adquirido mediante reportes, mediciones históricas, y la experiencia del personal de la planta. Por último, la información en terreno fue fundamental para el desarrollo del trabajo.

En cuanto al reconocimiento del sistema en terreno, es un hecho que el sistema de extracción de aire funciona con las dos bombas operativas en todo momento. Un problema que ocurre ocasionalmente son fugas de agua en la bomba, lo cual se soluciona revisando el estado del drenaje del separador, y corrigiendo el estado de las empaquetaduras de la bomba.

Al comenzar la investigación se tenía la hipótesis de que la bomba no operaba con sus dos etapas, sino que solo con una, y que era necesario habilitar la conexión entre etapas con la remoción del tapón expuesto en la figura 5.2. Dicha hipótesis fue rápidamente descartada mediante la información del manual de la bomba y en terreno, debido a que las dos etapas se encuentran conectadas, y ambas funcionan en conjunto ya que el rotor de ambas etapas está conectado a un único eje. Por otro lado, el tapón señalado tiene como función facilitar el desarme de la bomba, removiendo el tapón y instalando un cáncamo.

Continuando con la recopilación de información, se confeccionó un plano P&ID del sistema completo, contemplando desde el punto de extracción de los gases del condensador, hasta la evacuación del aire hacia la atmósfera. Dicho plano fue basado en los planos previos de la planta, y en la información en terreno, con lo que se generó un plano nuevo y con información detallada del sistema que será útil para el futuro de la planta. Durante la confección del P&ID, se realizó un listado de todos los componentes con sus características, que permitieron crear los códigos de cada componente del sistema con la codificación KKS. Dicha codificación se encuentra aún en proceso de actualización en el sistema para el momento de la finalización de este trabajo, por lo que será un gran aporte para poder generar un historial de avisos y fallas dirigido a cada componente en específico.

Con la información previamente señalada, se logró dar cumplimiento al primer objetivo

especifico, enfocado en el reconocimiento de los componentes del sistema, incluyendo sus instrumentos.

En segundo lugar, se analizó el problema de pérdida de vacío en el condensador, donde existía la hipótesis de que el problema eran las bombas de vacío, y que es necesario cambiar la tecnología, o agregar una bomba más. Mediante el cálculo del calor intercambiado en el condensador, se obtienen los gráficos de la figura 5.7, donde en particular la figura 5.7.c evidencia que se logra trabajar en con una menor presión en el condensador cuando el agua de enfriamiento está a menor temperatura. Los operadores de sala de control respaldan esta información, donde ellos declararon lograr una menor presión de operación en el condensador cuando los días son de menores temperaturas, como por ejemplo, en invierno. Por lo anterior, el condensador depende de la temperatura del agua de enfriamiento para alcanzar mejores valores de vacío. Puede resultar prometedor lograr vacíos menores a 35 mmHg, con el objetivo de aumentar eficiencia del ciclo combinado. Sin embargo, se debe comprender que este valor corresponde a la presión de diseño del condensador, la que considera parámetros ingenieriles en cuanto a la resistencia de los materiales en el condensador como en la turbina de vapor. Por otro lado, también se considera una optimización económica y de espacio al momento de definir la presión operativa del condensador. Como ya se mencionó, con una menor temperatura de agua de enfriamiento se logra operar con una menor presión en el condensador. A su vez, un mayor número de ventiladores en la torre de refrigeramiento permiten tener una temperatura de agua de enfriamiento menor. El óptimo considerando el consumo eléctrico de cada ventilador y el espacio utilizado por estos en comparación con al cambio de eficiencia en el ciclo por el cambio de presión operativa del condensador se calcula antes de la construcción de una planta, donde se decidió en este caso, 35 mmHg. En síntesis, siempre se debe buscar operar con 35 mmHg, y no probar con valores inferiores, ya que pueden afectar tanto al condensador como a la turbina de vapor, y se escapan del óptimo económico y eficiente de la planta. Los valores superiores a 35 mmHg son permitidos en ciertos rangos, y se presentan cuando la planta no está enfocada en la producción de energía en su máxima eficiencia. El límite superior para presentar alarma o detención de la planta por alta presión en la turbina a vapor se expone en la figura 2.2.

La eficiencia promedio calculada del condensador es de 56 %, solo inferior en un 2 % con la eficiencia calculada con los datos teóricos. Dicho valor es positivo, considerando que la planta opera desde 1997. En septiembre del año 2024, la planta se someterá a un mantenimiento mayor, en el cual se inspeccionará a detalle el condensador, logrando un estado aún mejor del condensador.

En cuanto a las infiltraciones tanto el cálculo proporcionado por el área de ingeniería como el calculado son bastante cercanos, donde el valor calculado promedio es un 5,4 % mayor. Con lo anterior, es se verifica que el condensador cuenta con altas infiltraciones, que superan los 160 Sm^3/h , Ya existen medidas en la planta para contrarrestar esto, con las pruebas de detección de fugas, la renovación y corrección de materiales en las tuberías y reparación de fugas. Durante el mantenimiento mayor de la planta se debe utilizar el tiempo para lograr mejorar todo el sistema y minimizar las infiltraciones.

Con lo previamente discutido, se logró dar cumplimiento al segundo objetivo específico, enfocado en el análisis del problema de pérdida de vacío en el condensador, y el impacto que

provoca el cambio de la presión de diseño del condensador en otros equipos, como la turbina a vapor y la torre de refrigeramiento. Se determina que el funcionamiento de las dos bombas de vacío es consecuencia de las altas infiltraciones del condensador, por lo que la solución no es variar la tecnología de extracción de vacío, o agregar otra bomba, sino que solucionar las infiltraciones del sistema. Eventualmente, con un menor volumen de infiltraciones, se podrá volver a la condición de diseño, con una única bomba de vacío operativa, y la otra de respaldo.

En tercer lugar, se analizó el control de la bomba de vacío, donde se determinó con el apoyo de los operadores de sala de control, que la información manejada en el sistema de control distribuido es ínfima, y esto causa desconfianza en la bomba, generando que no se utilice su sistema de control de nivel del separador, ya que siempre está con un nivel alto y desperdiciando agua hacia el drenaje. Por ello, se analizaron diferentes instrumentos del sistema, determinando su estado y sus parámetros operacionales. El cambio de la válvula solenoide por una válvula de bola ya se encuentra en proceso de gestión, lo cual significará una mejora en el tiempo de respuesta de reposición de agua. Para mejorar el sistema de control se proponen los siguientes puntos:

- Utilizar las señales de los instrumentos de los paneles de control de las bombas y enviarlas al sistema de control distribuido. Con ello, se podría supervisar el nivel de agua del separador, estado de la válvula de reposición de agua, estado de la válvula de admisión de la bomba.
- Utilizar las señales de los flujómetros para tener un reporte de estas en sala de control.
- Agregar un flujómetro en la zona señalada en la figura 5.19, con el fin de medir el caudal en una zona de flujo desarrollado.
- Cambiar la válvula solenoide de reposición de agua por una válvula con actuador. Dicho trabajo se encuentra en progreso.
- Modificar el diagrama relacionado al sistema de extracción de aire del sistema de control distribuido, con el fin de visualizar la nueva información.

Con lo anterior, se logró dar cumplimiento al tercer y cuarto objetivo específico, relacionados en mejorar el buscar mejoras para el sistema de control de la bomba de vacío, y revisar el funcionamiento de los componentes.

Bibliografía

- [1] Metropolitana, G., “Centrales”, 2023, <https://generadora.cl/instalaciones/centrales/>.
- [2] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., y Bailey, M. B., Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] GE Power Systems, Equipimet Manual Steam Turbine-Generator, 1997.
- [4] Connor, N., “What is heat exchanger – definition”, 2019, <https://www.thermal-engineering.org/what-is-heat-exchanger-definition/>.
- [5] NASH, U.S., Operation and maintenance instructions, Nash vacuum equipment, 1996.
- [6] NASH, “Cómo funcionan las bombas de vacío de anillo líquido”, 2023, https://www.nashpumps.com/es-cl/technologies-by-nash/technology-of-liquid-ring-vacuum-pumps?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=7013Z000001omVzQAI&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAjfyqBhAsEiwA-UdzJAWfrdY6OvxpVSPELSAsuD0_cad6YB16_q4ubr_cZTtolnsrx2q2cRoCDF0QAvD_BwE.
- [7] “Informe de medición de eficiencia bomba de vacío nash”, rep. tec., Aes Gener S.A., 2014.
- [8] “Informe de medición de eficiencia bomba de vacío nash”, rep. tec., Generadora Metropolitana, 2022.
- [9] Cengel, Y. A., . G. A. J., Transferencia de calor y masa (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [10] Pattanayak, L., Padhi, B. N., y Kodamasingh, B., “Thermal performance assessment of steam surface condenser”, Case Studies in Thermal Engineering, vol. 14, p. 100484, 2019.
- [11] Insider, L., “Standard cubic meter definition”, s/f, <https://www.lawinsider.com/dictionary/standard-cubic-meter>.
- [12] e.V., V. P., “Kks kraftwerk-kennzeichensystem pocketbook”, 2021, <https://www.vgb.org/shop/kks/kks000.html>.
- [13] Ltda, T. I., “Detección de fugas ciclo turbina, nueva renca, región metropolitana”, rep. tec., Generadora Metropolitana, 2023.
- [14] “Informe de ensayo n° pmi 01-23-010-26”, rep. tec., Proinspecta, 2024.