UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

Diseño de Plan de Mantenimiento para Planta de Osmosis Inversa de una Central de Cogeneración

Pablo Tomás Zúñiga Trujillo

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Ing. Luis Guzmán Bonet

Profesor Correferente: Ing. Nelson Álvarez Campillay

Agosto de 2021

I. Agradecimientos

Quiero dar gracias a Dios y a mis padres, por darme la vida y las grandes oportunidades que he tenido durante la misma, para hacer lo que me gusta y apasiona.

A mi madre, quien es un ejemplo para mí de lucha y superación. Sin sus enseñanzas, su crianza, y su educación, no sería hoy la persona que soy. A ella mi más profunda admiración, tras haber superado obstáculos tan grandes que la vida le ha puesto en frente. Sin importar cuán grande se vea la montaña, ella con total convicción la escala.

A mi padre, quien me enseña a ver siempre el lado positivo de las cosas, y ver lo mejor en otros. Agradecerle siempre por transmitirme el gusto por la mecánica, sin él, no estaría hoy estaría escribiendo estas palabras. Al igual que mi madre, mi más profunda admiración por su resiliencia, por sus ganas de seguir adelante, y por sus nervios de acero en situaciones complicadas.

Hermana, mi confidente y mejor amiga, tus palabras de aliento en los momentos difíciles siempre cumplen su cometido, veo en ti un ejemplo a seguir. Gracias por todo.

Mis amigos, Farid, Anselmo, Fabián, Natalia, Lukas, Ignacio, y tantos más. Sin duda esta carrera nos unió y nos mantendrá siempre juntos. Quiero agradecerles por las incontables jornadas de estudio juntos, así como los momentos de distensión. Por acompañarme en este camino y hacer mi vida universitaria tremendamente divertida y acogedora, a pesar de estar lejos de casa.

Mis amigos de la vida, Ernesto y Cristóbal con quienes siempre puedo contar en las buenas y las malas, y que han sido de gran ayuda cuando la he necesitado.

Quiero agradecer especialmente a las personas de Energía Pacífico, por permitir el desarrollo de esta memoria de titulación, confiar en mí y darme la oportunidad. A Rodolfo, Lester, Roberto, Jairo, César y todos los operadores por su gran disposición cuando fue requerida, sus grandes enseñanzas y su gran acogida.

Finalmente, a Luis Guzmán y Nelson Álvarez, mis profesores quienes me acompañaron en este proceso y guiaron para llevarlo a cabo, en especial a Nelson por además darme la oportunidad de ser su ayudante tantos semestres, y de quien aprendí mucho.

A todos ellos, y todos quienes no he mencionado acá pero que tienen un lugar especial en mi corazón y mis pensamientos, mis mejores deseos para sus vidas, espero que sean felices y que puedan cumplir sus sueños y metas.

Pablo Tomás Zúñiga Trujillo

II. Resumen

El presente trabajo de titulación tiene por objetivo principal diseñar un plan de mantenimiento a equipos críticos de una planta desmineralizadora de una central de cogeneración. Para lograr lo anterior, se establecen objetivos específicos a cumplir, seguido de una metodología de trabajo que permita conseguir cada una las metas fijadas, definiendo a su vez plazos para cada una de las tareas a través de una Carta Gantt.

Se comienza el trabajo mediante una contextualización de la central energética, su proceso, sus indicadores de rendimiento que definen su estrategia, entre otros parámetros. Al estudiar aquello, se entiende la importancia de la planta desmineralizadora en el proceso de generación de energía, para luego proceder a estudiar el proceso de desmineralización mediante osmosis inversa de igual manera como se hizo con la central, entendiendo el proceso productivo, los KPI's, y la estrategia. Esta parte del trabajo culmina con un listado de equipos.

Hecho lo anterior, se procede a evaluar la criticidad de los equipos a partir de herramientas entregadas por las normas ISO 31.000 e ISO 31.010, junto con la metodología RCM. Luego, se procede a hacer análisis FMEA a cada uno de los equipos del listado obtenido previamente, el cual sirve luego para realizar análisis de criticidad mediante indicadores numéricos a todos los equipos. Con lo anterior se obtiene una clasificación de activos, el cual sirve para jerarquizarlos en críticos, semicríticos y poco críticos, encontrándose con ocho equipos que clasifican dentro de la categoría de críticos. Lo anterior es útil para enfocar los esfuerzos y recursos en aquellos elementos que representan una alta criticidad para la organización.

A partir del paso previo, se procede a implementar la metodología 5S de mejoramiento continuo, la cual sirve de base y abre oportunidades de mejora para la implementación del pilar de mantenimiento autónomo de TPM, el cual permite delegar las tareas más básicas del mantenimiento, como limpieza e inspección, a los operadores, permitiendo que los primeros se enfoquen en las tareas proactivas. El resultado del pilar autónomo resulta en una mejora sustancial de los compresores en términos de disponibilidad y tasa de falla.

El paso siguiente consistió en diseñar planes de mantenimiento basados en las siete preguntas de RCM y su árbol de decisión, a aquellos equipos en los que fuese posible realizar actividades proactivas, pudiendo realizarse en seis de los ocho elementos. Con los planes de mantenimiento, se confecciona luego una planificación anual de actividades a través de un plan matriz.

Finalmente, el trabajo culmina con un análisis económico de los planes de mantenimiento proactivo, calculando el costo anual total que contempla el plan diseñado en este trabajo, comparándolo con la pérdida de ganancia de la organización por una falla intempestiva en la planta desmineralizadora, concluyéndose que la implementación del plan de mantenimiento trae beneficios operacionales y económicos.

III. Abstract

The current work, has as a main objective to design a maintenance plan for critical equipments of a desmineralization plant of a cogeneration plant. To achieve that, specific objectives are defined followed by a work methodology which allows to accomplish all the objectives established previously, defining at the same time deadlines for every task with a Gantt Chart.

The work begins by defining the operational context of the plant, it's productive process, performance indicators, strategy, etc. By studying this, the author understands better the meaning of the desmineralization plant in the process of energy generation, so then the process of that plant can be studied by the same way than before, understanding the process, KPI's and strategy. This part of the work finishes with a list of components.

Then an assessment of risk is made by using tools of the norms ISO 31.000 and ISO 31.010, and the RCM method. Therefore, an FMEA analysis is made for all the components of the list previously mentioned, which is useful for the criticality analysis by using numerical indicators for all the actives. With the above, a clasification of equipments is achieved, which is useful to rank the elements in critical, semicritical, and less critical, finding eight components of the plant that are critical. The previous, is useful to focus the resources into those elements that represent a high risk for the organization.

After that, 5S method is implemented, which is the base and allows to find improve opportunities for autonomous maintenance, which is a pillar of TPM. This permits to assign the most basics activities of maintenance to the operators, such as cleaning and inspection, giving the maintenance team a focus on the proactive tasks. The implementation of this results in a considerable improvement of the compressors in terms of disponibility and failure rates.

The next step consists on designing maintenance plans based on the seven questions and the task decision tree, of the RCM method, into the components that were able to do proactive activities, on six of the eight most critical. With the maintenance plans designed, a master plan is made in order to schedule the activities of a whole year.

Finally, this work finishes with an economical analysis of the proactive maintenance plans, calculating the total anual costs that this plans contemplates, comparing it with the loss of earns due to a non expected failure of the desmineralization plant because of the lack of maintenance. The final conclussion is that the implementation of this maintenance plan offers operational and economicals benefits.

IV. Acrónimos y unidades

POI: Planta de Osmosis Inversa.

RO: Reverse Osmosis

PLC: Controlador Lógico Programable, por sus siglas en inglés.

RCM: Mantenimiento basado en confiabilidad por sus siglas en inglés (Reliability Centred Mantainance).

5S: Sistema japonés de mejoramiento continuo.

TPM: Mantenimiento productivo total por sus siglas en inglés (Total Productive Mantainance).

MA: Mantenimiento Autónomo.

LUP: Lección de un punto.

HSEC: Acrónimo para salud operacional, seguridad, medio ambiente y comunidades por sus siglas en inglés.

KPI: Indicador clave de desempeño por sus siglas en inglés (Key Performance Indicator). Es una medida del nivel de rendimiento de un proceso.

SEN: Servicio Eléctrico Nacional.

BDMT: Tonelada métrica de biomasa seca por sus siglas en inglés (Bone Dry Metric Ton). Se refiere a la cantidad de masa seca del combustible, en este caso, biomasa.

SDI: Índice de densidad de sedimentos, por sus siglas en inglés.

Filtro CAA: Filtro de carbón activado.

OT: Orden de trabajo.

P&ID: Diagrama de tuberías e instrumentación por sus siglas en inglés.

PLC: Controlador Lógico Programable (por sus siglas en inglés).

RRHH: Recursos humanos.

RAE: Real Academia Española

EBITDA: Indicador económico que indica las ganancias antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización. El nombre proviene del acrónimo en inglés de los componentes antes mencionados.

T°: Temperatura. Grado o nivel térmico de un cuerpo.

[W]: Watt. Unidad de potencia del Sistema Internacional, equivalente a 1 Julio por segundo

[MW]: Mega Watt. Unidad de potencia equivalente a 1 millón de Watts.

[MWh]: Mega Watt hora. Unidad de energía expresada en forma de unidades de potencia por tiempo. Comúnmente utilizado al hablar de consumo de energía eléctrica

[V]: Voltio. Unidad derivada del Sistema Internacional para el potencial eléctrico, la fuerza electromotriz y la tensión eléctrica.

[KV]: Kilovoltio. Unidad de tensión eléctrica equivalente a mil voltios.

[Hz]: Hertz. Unidad de frecuencia equivalente a 1 ciclo por segundo.

[Ton/h]: Tonelada por hora. Unidad de flujo de masa, utilizado en este trabajo para expresar el consumo de combustible.

[m^3/h]: Metros cúbicos por hora. Unidad de caudal, utilizado en este trabajo para expresar el consumo de agua.

[µS/cm]: Microsiemens por centímetro. Unidad de conductividad eléctrica.

[°C]: Grados Celsius. Unidad de temperatura, donde el cero equivale al punto de congelación del agua a presión atmosférica, y el cien al punto de ebullición a la misma presión.

[Bar]: Unidad de presión equivalente a un millón de barias.

[Psi]: Unidad de presión equivalente a una libra por pulgada cuadrada.

[mm c.d.a.] : Unidad de presión equivalente a un milímetro columna de agua.

[dB]: decibelios. Unidad de medida para la intensidad sonora.

pH: Potencial de hidrógeno. Parámetro que indica el nivel de acidez de una sustancia.

Índice de contenidos

I. Agradecimientos I
II. Resumen II
III. Abstract III
IV. Acrónimos y unidades IV
Índice de tablas IX
Índice de figuras XII
1 Introducción 1
2 Objetivos 2
3 Metodología de trabajo 3
3.1 Estrategia de mantenimiento 3
3.2 Levantamiento 3
3.3 Criticidad 3
3.4 Plan de Mantenimiento 3
3.5 Factibilidad económica 3
4 Marco Teórico 5
4.1 Mantenimiento 5
4.1.1 Mantenimiento predictivo (a condición) 7
4.1.2 Mantenimiento preventivo 9
4.1.3 Mantenimiento correctivo 10
4.1.4 Indicadores del mantenimiento 10
4.1.5 Costos de mantenimiento 11
4.2 TPM 12
4.2.1 Mantenimiento autónomo 15
4.2.2 5S 17
4.2.3 OEE 18
4.3 RCM 19
4.3.1 Norma SAE JA1011 20
4.3.2 Norma SAE JA1012 20
4.4 Gestión del riesgo 23
4.4.1 ISO 31.010 24
4.5 Taxonomía según ISO 14.224 26
4.6 Osmosis inversa (RO) 29

4.6.1 Indicadores de calidad del agua 32
4.7 Bombas 34
4.7.1 Bomba Centrífuga 34
4.7.2 Bomba centrífuga vertical multietapa 37
4.8 Compresión de aire 39
4.8.1 Compresores de tornillo 40
4.8.2 Acumuladores 42
5 Antecedentes generales 44
5.1 La empresa 44
5.1.1 Misión 45
5.1.2 Visión 45
5.2 El proceso de generación 46
5.3 La planta desmineralizadora 49
5.4 La sala de compresores 52
5.5 Listado de equipos 53
5.5.1 Sala de compresores 53
5.5.2 Equipos POI 53
5.5.3 Válvulas automáticas POI 54
5.5.4 Válvulas manuales POI 55
5.5.5 Instrumentos POI 56
5.5.6 Indicadores POI 57
6 Criticidad 58
6.1 Contexto operacional 58
6.2 Historial de fallas 64
6.3 Análisis FMEA 68
6.4 Análisis de criticidad 70
6.5 Jerarquización 72
7 Diseño de plan de mantenimiento 75
7.1 5S 75
7.2 Mantenimiento Autónomo 83
7.2.1 Compresores 83
7.2.2 Planta de Osmosis Inversa 89
7.3 Mantenimiento proactivo 96

7.3.1 Membranas de RO 97
7.3.2 Bombas de alta presión 98
7.3.3 Bombas de alimentación 101
7.3.4 Compresores 101
7.3.5 Filtro CAA 102
7.3.6 Acumulador de aire comprimido 103
7.3.7 PLC 103
7.4 Plan matriz de mantenimiento 104
8 Análisis económico 106
9 Conclusiones 112
9.1 Conclusiones principales 112
9.2 Conclusiones específicas 112
9.3 Recomendaciones 114
10 Bibliografía 115
11 Anexos 117
11.1 Planta de osmosis inversa 117
11.2 Análisis FMEA 119
11.3 Análisis de criticidad 124
11.4 Auditoría 5S planta desmineralizadora 133
11.5 Capacitaciones 135
11.6 Árbol de componentes 137
11.6.1 Compresores 137
11.6.2 Bomba 138
11.6.3 Filtro de carbón activado 139
11.6.4 Membranas de Osmosis inversa 140

Índice de tablas

Tabla 3.1: Carta Gantt de planificación de actividades para llevar a cabo el trabajo de título. 4
Tabla 4.1: Ejemplo de matriz de riesgo que incluye factores económicos, de seguridad y medioambiente. 25
Tabla 4.2: Definición y ejemplos de los niveles de taxonomía. 28
Tabla 4.3: Valores típicos de conductividad para distintos tipos de agua. 33
Tabla 5.1: SIPOC del proceso de desmineralización. 50
Tabla 5.2: Listado de equipos de la sala de compresores. 53
Tabla 5.3: Listado de equipos más importantes de la POI. 53
Tabla 5.4: Listado de válvulas automáticas presentes en la POI. 54
Tabla 5.5: Listado de válvulas manuales presentes en la POI 55
Tabla 5.6: Instrumentación de la POI 56
Tabla 5.7: Listado de indicadores de la POI con las observaciones encontradas 57
Tabla 6.1: Indicadores operacionales del agua de desmineralización en sus distintas etapas. 60
Tabla 6.2: Resumen de antecedentes de fallas ocurridos en la planta desmineralizadora . 66
Tabla 6.3: Indicadores de mantenimiento para equipos con fallas frecuentes. 67
Tabla 6.4: Análisis FMEA realizado para la bomba de alta presión de la I etapa de la RO. 68
Tabla 6.5: Matriz de análisis de criticidad confeccionada para evaluar el impacto de las fallas bajo los aspectos descritos en la misma. 70
Tabla 6.6: Análisis de criticidad de la bomba de alta presión de la I etapa de la RO. 71
Tabla 6.7: Definición de tipos de criticidad según el puntaje obtenido en la matriz de criticidad. 72
Tabla 6.8: Jerarquización de los equipos según los niveles de criticidad analizados en el punto 6.3 73
Tabla 7.1: Registro de limpieza e inspección de la sala de compresores. 88
Tabla 7.2: Registro de limpieza de la planta de osmosis inversa, junto con las actividades a realizar y sus frecuencias. 96
Tabla 7.3: Plan de mantenimiento proactivo de membranas de RO. 98
Tabla 7.4: Plan de mantenimiento proactivo para bomba vertical multietapas de alta presión de la I etapa de la RO. 99
Tabla 7.5: Plan de mantenimiento proactivo para la bomba vertical multietapas de alta presión de la II etapa de la RO. 100
Tabla 7.6: Plan de mantenimiento proactivo para bomba centrífuga de alimentación de la RO. 101
Tabla 7.7: Plan de mantenimiento proactivo para los compresores de aire. 102
Tabla 7.8: Plan de mantenimiento proactivo para el filtro de carbón activo. 103
Tabla 7.9: Plan matriz de mantenimiento anual para la planta desmineralizadora. 105
Tabla 8.1: Ingresos por hora por venta de energía eléctrica. 107
Tabla 8.2: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de los compresores. 108

Tabla 8.3: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de las membranas de osmosis inversa. 108
Tabla 8.4: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de la bomba de alta presión de la primera etapa de la osmosis inversa. 109
Tabla 8.5: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de la bomba de alta presión de la segunda etapa de la osmosis inversa. 109
Tabla 8.6: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de las bombas de alimentación de la osmosis inversa. 109
Tabla 8.7: Costos de inversión en instrumentos para las mediciones del mantenimiento predictivo. 110
Tabla 8.8: Costos fijos de personal requerido por el presente plan de mantenimiento. ... 110
Tabla 8.9: Costos totales de mantenimiento presupuestados en el presente plan. 110
Tabla 8.10: Costo anual real de mantenimiento que presenta el plan diseñado. 111
Tabla 11.1: Análisis FMEA para la bomba de alta presión de la II etapa de la osmosis inversa. 119
Tabla 11.2: Análisis FMEA de la bomba de agua cruda que alimenta a la RO. 119
Tabla 11.3: Análisis FMEA de la bomba de retrolavado. 120
Tabla 11.4: Análisis FMEA para el PLC de la planta de osmosis. 120
Tabla 11.5: Análisis FMEA para el sistema de piping de la planta desmineralizadora. .. 120
Tabla 11.6: Análisis FMEA para los filtros de cartucho de 1 micra. 121
Tabla 11.7: Análisis FMEA para las membranas de osmosis inversa y tubos porta membranas. 121
Tabla 11.8: Análisis FMEA para las bombas dosificadoras de químicos del proceso de RO. 121
Tabla 11.9: Análisis FMEA para los compresores de aire. 122
Tabla 11.10: Análisis FMEA para los secadores de aire. 122
Tabla 11.11: Análisis FMEA para los filtros de aire. 123
Tabla 11.12: Análisis FMEA para el acumulador de aire. 123
Tabla 11.13: Análisis FMEA para el filtro de carbón activado. 123
Tabla 11.14: Análisis de criticidad de la bomba de alta presión de la II etapa de la RO. 124
Tabla 11.15: Análisis de criticidad para las bombas de agua cruda. 124
Tabla 11.16: Análisis de criticidad para la bomba de retrolavado. 125
Tabla 11.17: Análisis de criticidad del PLC de la planta de osmosis inversa. 125
Tabla 11.18: Análisis de criticidad del sistema de piping de la planta desmineralizadora. 126
Tabla 11.19: Análisis de criticidad de la instrumentación de la planta desmineralizadora. 126
Tabla 11.20: Análisis de criticidad del filtro de carbón activado. 127
Tabla 11.21: Análisis de criticidad del filtro de cartucho de 1 micra. 127
Tabla 11.22: Análisis de criticidad de las membranas de RO y tubos porta membranas. 128
Tabla 11.23: Análisis de criticidad de las bombas dosificadoras de químicos. 128
Tabla 11.24: Análisis de criticidad de los indicadores de presión. 129

Tabla 11.25: Análisis de criticidad de los Presóstatos presentes en la planta desmineralizadora. 129
Tabla 11.26: Análisis de criticidad de los compresores de aire. 130
Tabla 11.27: Análisis de criticidad de secadores de aire. 130
Tabla 11.28: Análisis de criticidad de los filtros de aire. 131
Tabla 11.29: Análisis de criticidad de los acumuladores de aire comprimido. 131
Tabla 11.30: Análisis de criticidad del estanque de agua permeada. 132

Índice de figuras

Figura 4.1: Diagrama del proceso del mantenimiento. 6
Figura 4.2: Tipos de mantenimiento agrupados en acciones antes de la falla y después de la falla. 7
Figura 4.3: Curva S-F que demuestra el funcionamiento del mantenimiento predictivo, entre que se detecta el tiempo de la condición de falla (S) y la falla funcional (F). 8
Figura 4.4: Actividades básicas del mantenimiento en un proceso de TPM 13
Figura 4.5: Objetivos específicos del TPM según el área de aplicación. 14
Figura 4.6: Esquema organizacional del TPM 15
Figura 4.7: Propósito de la implementación de 5S en el área de trabajo. 18
Figura 4.8: Árbol de decisión RCM que resume la metodología de esta herramienta de gestión del mantenimiento. 22
Figura 4.9: Clasificación taxonómica en forma de pirámide. 27
Figura 4.10: De izquierda a derecha, principio de la osmosis, el equilibrio osmótico y la osmosis inversa respectivamente. 29
Figura 4.11: Diseño y componentes de una planta de osmosis inversa de un sólo paso. ... 30
Figura 4.12: Estructura y composición de una típica membrana de osmosis inversa para desalinización de agua. 30
Figura 4.13: Saturación de una membrana de osmosis inversa y su relación con el flujo permeado. 31
Figura 4.14: Bomba centrífuga de una etapa a la izquierda, acoplada a un motor eléctrico a la derecha. 34
Figura 4.15: Funcionamiento de una bomba centrífuga, donde las flechas indican la dirección del flujo. 34
Figura 4.16: Curvas características de una bomba centrifuga de una etapa, con las variables necesarias para la elección de la misma. 35
Figura 4.17: Componentes de una bomba centrífuga de una etapa. 36
Figura 4.18: Ejemplo de una bomba centrífuga vertical multietapa. En la parte inferior se aprecian las bridas de succión y descarga. 37
Figura 4.19: Componentes de una bomba vertical multietapa. 38
Figura 4.20: Esquema de un sistema ordinario de aire comprimido enumerado según la lista presentada anteriormente. 40
Figura 4.21: Esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo, enumerado según el párrafo anterior. 41
Figura 4.22: Esquema de funcionamiento de los sistemas auxiliares de un compresor de tornillo. 42
Figura 4.23: Acumulador emplazado en una sala de compresores de una central de cogeneración 43
Figura 5.1: Organigrama de la empresa. 45
Figura 5.2: Diagrama de proceso de la planta de cogeneración con los valores operacionales más importantes del proceso. 48

Figura 5.3: Diagrama del proceso de desmineralización del agua con valores de flujos del proceso. 51
Figura 5.4: Diagrama del proceso de compresión de aire necesario para toda la planta. 52
Figura 6.1: Taxonomía del lugar de aplicación del siguiente trabajo de titulación según ISO 14.224. 58
Figura 6.2: Gráfico de distribución de los equipos según los niveles de criticidad. 74
Figura 7.1: Mejora 5S de reubicación del basurero de la planta de osmosis inversa. 75
Figura 7.2: Mejora 5S de cartel interior descriptivo del proceso de osmosis inversa. 76
Figura 7.3: Mejora 5S de instalación de extintor de CO2 para panel eléctrico. 76
Figura 7.4: Mejora 5S de rotulado de etiquetado de manómetros de la osmosis inversa. . 77
Figura 7.5: Mejora 5S de pintado de piso que facilita la detección de pozas por fugas. ... 77
Figura 7.6: Mejora 5S de demarcación de tableros eléctricos. 78
Figura 7.7: Mejora 5S de pintado y etiquetado de tuberías. 78
Figura 7.8: Mejora 5S de etiquetado de válvulas al interior de la planta de osmosis. 79
Figura 7.9: Mejora 5S de carteles exteriores descriptivos de proceso y normas de seguridad. 79
Figura 7.10: Mejora 5S de entrada lado norte a la planta de osmosis inversa, para disminuir el ingreso de polución. 80
Figura 7.11: Mejora 5S de entrada lado sur a la planta de osmosis inversa, para disminuir el ingreso de polución. 80
Figura 7.12: Mejora 5S de cambio de estación de químicos, a un galpón fuera de la planta por razones de seguridad. 81
Figura 7.13: Resultado general de la implentación de la metodología 5S en la planta de osmosis inversa. 81
Figura 7.14: Estándar 5S de la planta de osmosis inversa. 82
Figura 7.15: Operador revisando el filtro de aire, identificando exceso de polvo en este. 83
Figura 7.16: Operador limpiando el ventilador del compresor con aire comprimido. 84
Figura 7.17: Operadores se familiarizan con el conjunto interno del equipo, su funcionamiento y componentes. 84
Figura 7.18: Trabajadores aprenden a limpiar el conjunto interno del compresor para evitar fallas por falta de limpieza. 85
Figura 7.19: Operadores limpian tapas de compresores además del conjunto interno. 85
Figura 7.20: Fotocopia del documento de respaldo de capacitaciones interno de la organización. 86
Figura 7.21: Protocolo de limpieza interna de compresores hecho para operadores. 87
Figura 7.22: Limpieza inicial de canaletas de la osmosis inversa. 89
Figura 7.23: Limpieza inicial de la primera etapa de la osmosis inversa. 89
Figura 7.24: Limpieza inicial de la estación de retrolavado de la osmosis inversa. 90
Figura 7.25: Limpieza de la segunda etapa de la osmosis inversa. 90
Figura 7.26: Lección de un punto acerca del cambio de filtro de cartuchos. 91
Figura 7.27: Lección de un punto acerca de la operación de la planta RO en modo manual. 91
Figura 7.28: Entrada lado norte a la planta de osmosis inversa. 92

Figura 7.29: Entrada lado sur a la planta de osmosis inversa. 93
Figura 7.30: Cubículo de entrada al lado norte de la planta. 93
Figura 7.31: Vista interior de la entrada norte de la planta. 94
Figura 7.32: Vista interior de la entrada sur de la planta. 94
Figura 7.33: Plan de limpieza de la planta de osmosis inversa, presente en el cuadro de área de la planta. 95
Figura 8.1: Costo marginal de la electricidad para las distintas barras de alimentación. 106
Figura 11.1: P&ID de la planta de osmosis inversa. 118
Figura 11.2: Auditoría 5S realizada a la planta de osmosis inversa. 134
Figura 11.3: Capacitación de limpieza interna de compresores a uno de los turnos de los operadores. 135
Figura 11.4: Capacitación de limpieza interna de compresores realizada a los operadores. 136
Figura 11.5: Árbol de componentes de un compresor de tornillo. 137
Figura 11.6: Árbol de componentes de una bomba centrífuga. 138
Figura 11.7: Árbol de componentes del filtro CAA de la planta desmineralizadora. 139
Figura 11.8: Árbol de componentes de una membrana de osmosis inversa. 140

1 Introducción

El agua es un recurso vital para existencia en la Tierra, no tan sólo para la vida entendida de manera biológica, sino también para la industria en general, que se encarga de satisfacer todas las demandas que el mundo moderno exige. Así, el agua puede ser utilizada para generar electricidad, procesar minerales necesarios para componentes electrónicos, procesar papel, por sólo mencionar algunos ejemplos de cómo la industria utiliza este recurso.

A grandes rasgos, en un proceso de generación de energía, el agua debe ser calentada hasta convertirse en vapor, para que éste mueva una turbina conectada a un generador, y el agua vuelva a estado líquido, para que vuelva a ser calentada. Como todo en la vida, este proceso posee pérdidas, por lo que el agua debe ser repuesta continuamente para poder completarse el ciclo.

Por otro lado, el agua debe ser tratada previamente antes de poder entrar en este ciclo de generación, dado que los equipos son bastante sensibles y el agua sin tratar podría generar corrosión en ellos y otras consecuencias. Es por los motivos mencionados, que este tipo de industrias poseen plantas desmineralizadoras, las cuales se encargan de obtener agua de una fuente cualesquiera, tratarla y dejarla en condiciones óptimas para ser ingresada al ciclo de generación.

Una planta desmineralizadora, a su vez, posee una serie de máquinas y procesos que permiten lograr su objetivo los cuales deben fallar lo menos posible, dado que lo anterior podría traer graves consecuencias no tan sólo en la producción, sino que también en la seguridad de los trabajadores, el medio ambiente o las comunidades cercanas a la planta.

Por lo anterior, el presente trabajo de título presenta un plan de mantenimiento para una planta desmineralizadora de una central de cogeneración, enfocada en los equipos más críticos para el proceso mediante un modelo de gestión de mantenimiento y considerando el contexto operacional en el que se encuentra esta planta, para así poder operar de manera más eficiente, eficaz y segura. Además, se presenta un análisis económico de la implementación de este plan, con el que se da herramientas para que la empresa decida su implementación o no.

2 Objetivos

El objetivo principal que busca este trabajo de título es diseñar un plan de mantenimiento para equipos críticos para la planta de osmosis inversa de una central de cogeneración, considerando el contexto operacional y evaluando el impacto que éste plan pueda tener.

Para lograr lo anterior, es necesario definir y trabajar en los objetivos específicos que se detallan a continuación:

1. Realizar un levantamiento del estado actual de la planta en términos estratégicos, operativos y económicos.
2. Estudiar la criticidad de los componentes, equipos y procesos para jerarquizar el plan de mantenimiento hacia los elementos cruciales.
3. Escoger una estrategia de mantenimiento acorde a los requerimientos de la organización.
4. Confeccionar un plan de mantenimiento para equipos críticos.
5. Estudiar la factibilidad económica del plan de mantenimiento en términos de costos, recursos humanos y la efectividad total de equipos (O.E.E.).

3 Metodología de trabajo

Para lograr los objetivos antes propuestos, es necesario definir una metodología de trabajo que permita cumplir los anteriores. Por ello, se ha definido una ruta de trabajo, en la cual se han dado etapas y tareas que se deben cumplir para poder cumplir con el motivo de este trabajo de título.

A continuación se presenta la metodología de trabajo a seguir:

3.1 Estrategia de mantenimiento

- Estudiar la estrategia de mantenimiento TPM, y comprender sus alcances y objetivos.
- Estudiar si hay herramientas de RCM que son aplicables a este trabajo y si se adecuan a las necesidades y condiciones de la empresa.

3.2 Levantamiento

- Estudiar el contexto operacional y la estrategia de la organización.
- Estudiar el proceso de la empresa.
- Confeccionar un listado de equipos presentes en la planta.

3.3 Criticidad

- Entrevistar a operadores y encargados, sobre las fallas y las consecuencias de éstas.
- Realizar un análisis de modos de falla con la información obtenida.
- Realizar un análisis de criticidad de equipos.
- Jerarquizar equipos críticos, semicríticos y no críticos a partir del punto anterior.

3.4 Plan de Mantenimiento

- Definir medidas de mantenimiento autónomo cuando sea posible y pertinente.
- Definir medidas de mantenimiento proactivas.
- Confeccionar una calendarización, planificación y rutas de actividades que estandaricen las tareas del mantenimiento.

3.5 Factibilidad económica

- Definir los RRHH, materiales, instrumentos y repuestos necesarios para llevar a cabo el plan confeccionado.
- Estudiar los beneficios de la implementación del plan de mantenimiento.

Se ha fijado un plazo para cumplir las tareas antes expuestas de 20 semanas, considerando que se trabajará de lunes a viernes de 8:30 hrs. A 18:30 hrs en la planta de cogeneración. Como el trabajo será ejecutado en terreno, esto permite avanzar mucho más rápido a la hora de hacer levantamientos, mediciones o resolver dudas con los operadores y/o supervisores. El detalle de la duración de cada tarea se puede apreciar en la siguiente Carta Gantt:

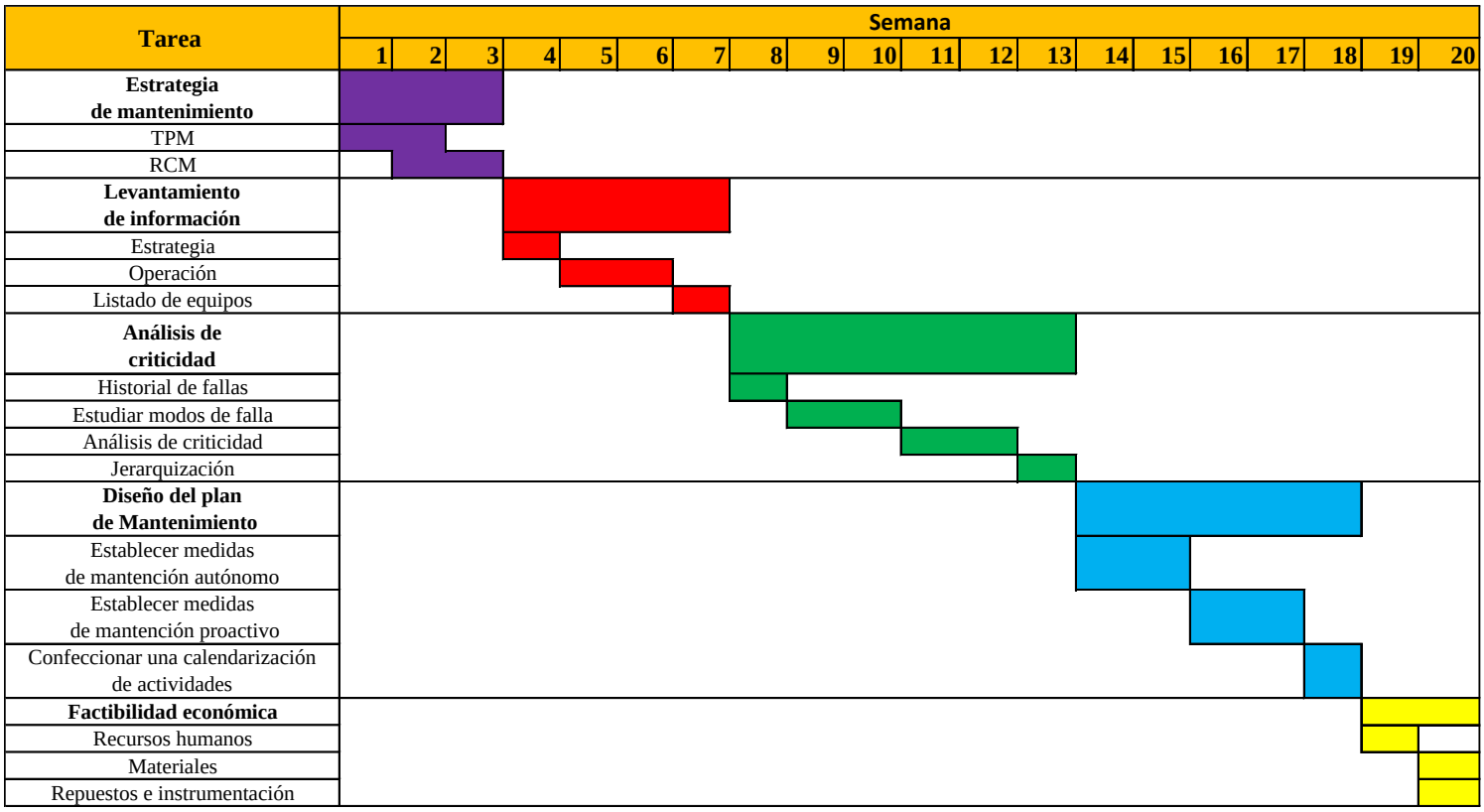


Tabla 3.1: Carta Gantt de planificación de actividades para llevar a cabo el trabajo de título.

Fuente: Elaboración propia.

4 Marco Teórico

Para mejorar la comprensión del lector acerca de los distintos tópicos que aborda el presente trabajo de título, es que se presenta un marco teórico que contextualiza, expone y desarrolla información necesaria y que podría resultar de interés.

La presente sección aborda y explica temas como el mantenimiento, las normas a utilizar para el correcto desarrollo del presente trabajo, metodologías de mejora continua, funcionamiento de activos, entre otros.

4.1 Mantenimiento

El manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización de Alejandro Pistarelli, define el mantenimiento como *"Proceso que tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad para las funciones de la instalación en su contexto operativo, valiéndose de talentos humanos, recursos, activos, controles y mecanismos de gestión, y satisfaciendo los niveles de Producción/Servicio comprometidos por la Organización durante un determinado horizonte de tiempo con los estándares de seguridad vigentes y sin recurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores." (Pistarelli, 2010, p.20).* Lo anterior, se resume en la siguiente figura:

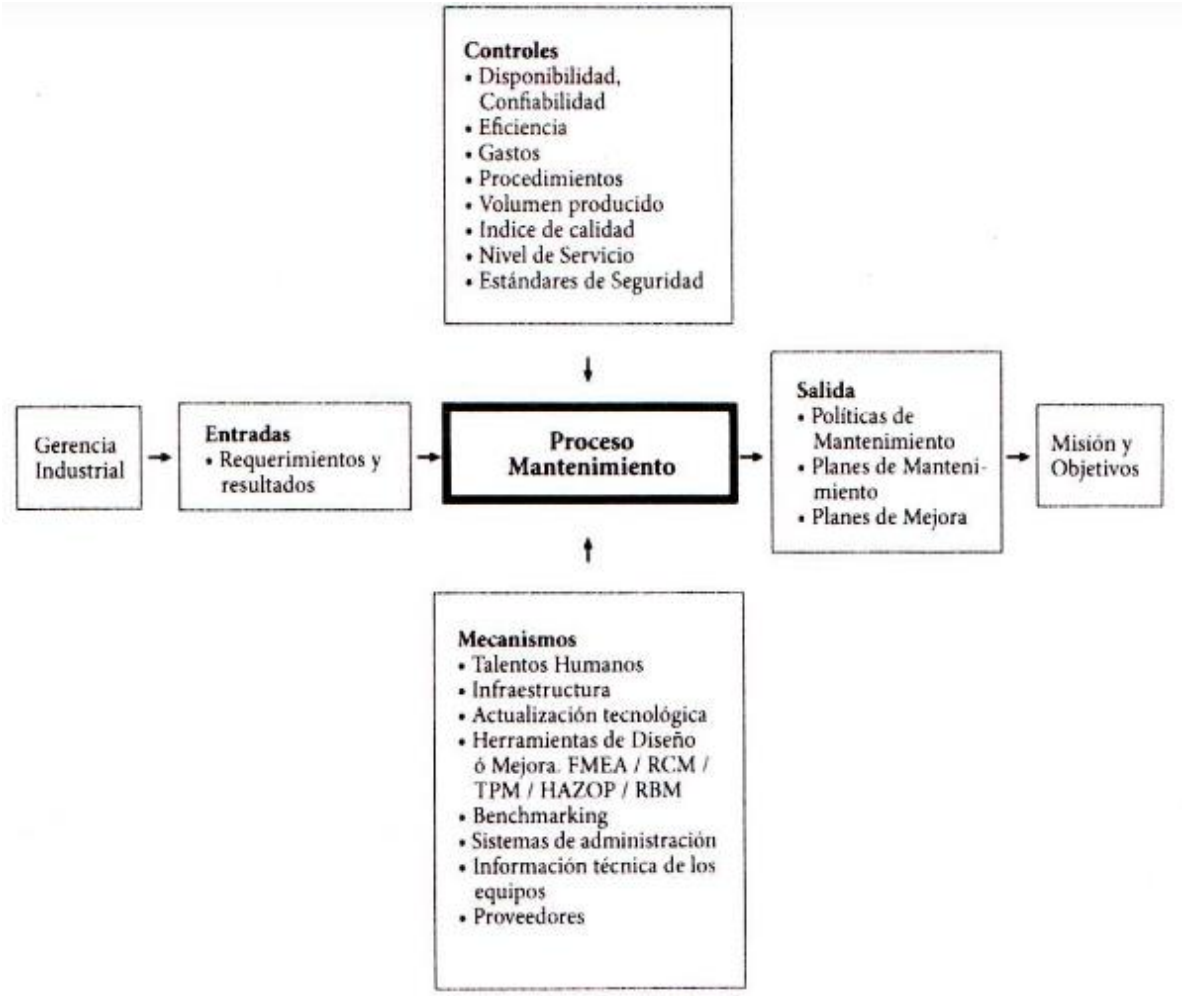


Figura 4.1: Diagrama del proceso del mantenimiento.

Fuente: Pistarelli, A. (2010). Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.

La Figura 4.1 entrega un panorama global de cómo opera el mantenimiento en cuanto a sus necesidades, entradas, mecanismos y salidas que satisfacen objetivos dados. Es importante destacar la importancia que le da el autor a la seguridad, pues hoy en día este es un aspecto muy importante cuando se habla de cualquier variable operacional.

En palabras sencillas, y llevándolo a un contexto de operaciones industriales, el mantenimiento puede ser entendido como el conjunto de actividades para mantener la disponibilidad de equipos y procesos en parámetros aceptables sin afectar al HSEC, y maximizando el EBITDA.

Cuando se habla de disponibilidad, se habla básicamente del tiempo en que un equipo o proceso está disponible para su uso, independiente del aprovechamiento que éste tenga.

Las maneras en las que se realiza el mantenimiento, se suelen describir como tipos de mantenimiento. En general, se pueden separar en dos grandes grupos, antes de la falla (acciones pro-activas), o después de la falla (acciones reactivas), dentro de las cuales, existen maneras distintas de ejecutar el mantenimiento.

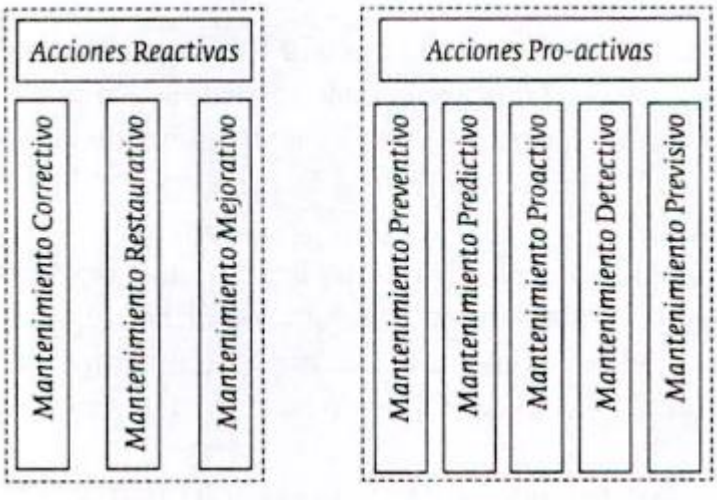


Figura 4.2: Tipos de mantenimiento agrupados en acciones antes de la falla y después de la falla.

Fuente: Pistarelli, A. (2010). Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.

En general, las acciones pro-activas son aplicadas a equipos o procesos críticos, cuya falla genera grandes consecuencias en el HSEC o en los costos. Además, por lo general este tipo de mantenimiento genera una serie de beneficios listados a continuación:

- Tiempo reducido de mantenimiento
- Reduce costos de daños secundarios
- Mejora la detección de fallas potenciales
- Reduce el potencial daño a personas y el medio ambiente
- Reduce la administración de los gastos de mantenimiento

A su vez, las acciones reactivas se suelen aplicar a equipos de baja criticidad, cuya falla no genera grandes pérdidas de producción ni es un riesgo considerable al HSEC. A continuación, se profundizará en los tipos de mantenimiento más relevantes para el presente trabajo, y que en general, son los más utilizados en la industria.

4.1.1 Mantenimiento predictivo (a condición)

El mantenimiento predictivo (también llamado a condición) propone que es posible detectar síntomas prematuros de desperfectos o desajustes, tiempo antes de que se produzca una detención no deseada. Lo anterior, no es del todo “certero”, dado que es imposible predecir con total certeza cuándo se producirá la falla.

Debido a lo anterior, es que este tipo de mantenimiento también es llamado a condición, ya que se presume que los componentes realmente "avisan" antes de que fallen. Así, a través de herramientas tecnológicas adecuadas, se puede monitorear la curva de su estado.

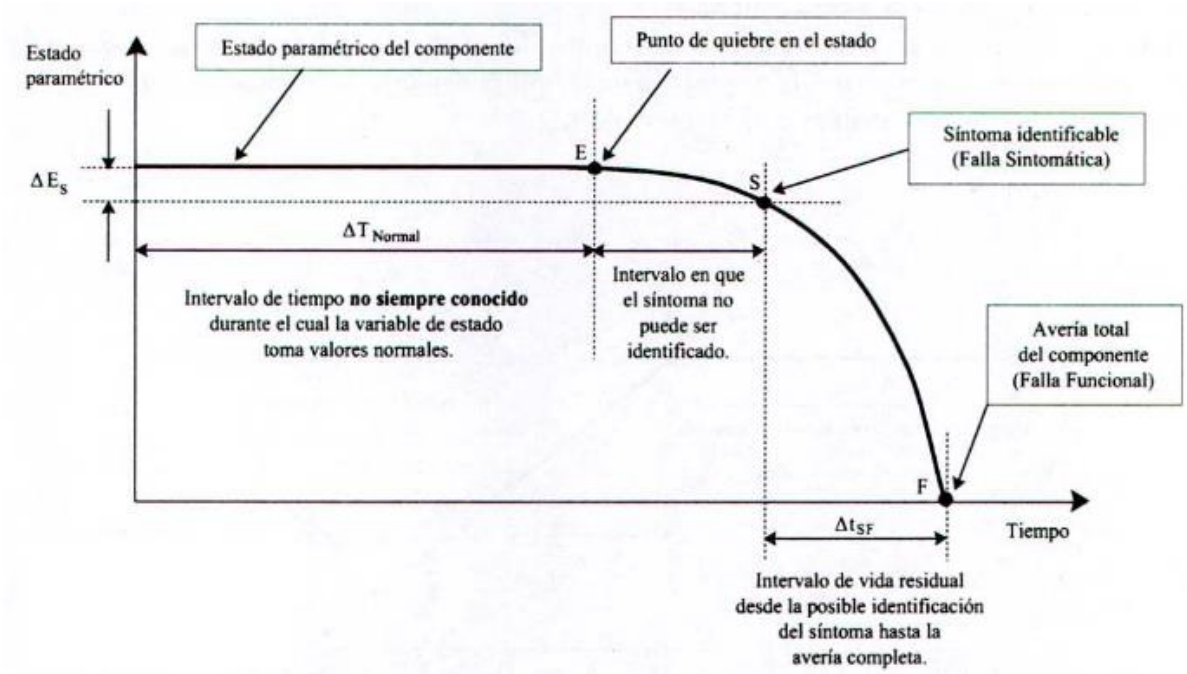


Figura 4.3: Curva S-F que demuestra el funcionamiento del mantenimiento predictivo, entre que se detecta el tiempo de la condición de falla (S) y la falla funcional (F).

Fuente: Pistarelli, A. (2010). Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.

La Figura 4.3 demuestra cómo la detección de una variable medible y objetiva fuera de rango, permite identificar que un elemento, equipo o proceso ha entrado en falla antes de que éste entregue evidencias más claras del diagnóstico antes dado. Como se puede apreciar, desde la identificación de la falla (S) hasta la falla funcional (F), existe un periodo de tiempo, llamado vida residual, donde el equipo aún puede funcionar, claro que no en las condiciones óptimas.

Este periodo de vida residual, permite, en primer lugar, aprovechar de mejor forma la vida útil de los componentes, haciendo que las inversiones se aprovechen al máximo. En segundo lugar, permite una mejor planificación de la reparación, lo que conlleva a una mejor realización del trabajo, reduciendo los costos y además entregando mejores condiciones de seguridad a los operadores al no trabajar bajo tanta presión.

Las técnicas más utilizadas para este tipo de mantenimiento son:

- Análisis de vibraciones
- Termografía infrarroja
- Pirometría óptica

- Inspección por ultrasonido
- Cromatografía de líquidos y gases
- Emisión acústica
- Estetoscopía industrial
- Inspección con tintas penetrantes
- Tribología
- Rayos X

4.1.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo busca disminuir la frecuencia de detenciones no programadas aprovechando el momento más oportuno tanto para producción como para mantenimiento, permitiendo una planificación completa en cuanto a repuestos, insumos y personal.

Se realiza a espacios de tiempo, horas, ciclos, etc. Regulares bien definidos y sin importar el estado del ítem a mantener. Para determinar la cantidad de ciclos, se puede basar en los manuales de los equipos que entregan los proveedores y el contexto operacional en el que estos trabajan.

Un ejemplo de mantenimiento preventivo para una bomba centrífuga de agua, es decir que se establece que cada 3 meses se realice un cambio de rodamientos, independiente del estado en el que estos se encuentren.

Lo anterior, aumenta sin duda, la confiabilidad del equipo, ya que se reduce considerablemente la probabilidad de falla del activo debido al modo de falla específico de rodamientos. Sin embargo, la vida útil de dicho rodamiento se reduce bastante, ya que en general, los ciclo de mantenimiento se establecen por debajo de la vida útil de los componentes, generando así pérdidas al no aprovechar completamente el ciclo de vida del componente, equipo o sistema.

El caso antes expuesto, es extrapolable a todo el mantenimiento preventivo, cuya principal ventaja es aumentar la confiabilidad, disminuyendo por consiguiente la probabilidad de falla del equipo, componente o sistema. A su vez, la principal desventaja es la pérdida parcial de activos al no aprovechar completamente su vida útil para la cual fue diseñado.

4.1.3 Mantenimiento correctivo

Consiste en la reparación de averías o fallos funcionales a medida que se van produciendo. Quien detecta la falla es el operador, quien debe realizar el levantamiento de ésta acudiendo a quien corresponda para ejecutar la reparación, pudiendo incluso realizarla él mismo.

La principal ventaja del mantenimiento correctivo es que requiere de poca planificación, aunque algunas fallas generan la detención completa de la operación, generando grandes pérdidas en cantidad y calidad.

Las desventajas son mencionadas a continuación:

- Se debe contar con excesivo personal de mantenimiento, aumentando los gastos.
- Incrementa el número de equipos en paralelo (stand-by), aumentando el capital inmovilizado.
- Se dificulta la confección de presupuestos, aumentando los gastos de operación y mantenimiento.
- En general se debe proceder de forma acelerada, aumentando el riesgo de accidentes.

4.1.4 Indicadores del mantenimiento

Como se mencionó en un principio, el mantenimiento busca mantener la disponibilidad dentro de parámetros aceptables para la organización con los menores costos posibles. Para ello, existe KPI's que permiten identificar de manera objetiva el cumplimiento de metas.

La disponibilidad operacional, entendida como el tiempo en que un equipo o sistema está apto para operar, se mantiene con dos pilares fundamentales, que son la mantenibilidad y la confiabilidad. La mantenibilidad puede ser definida como la probabilidad de que se cumpla el tiempo estimado de reparación planificado para un elemento, equipo o sistema. A su vez, la confiabilidad es la probabilidad que el equipo opere adecuadamente un tiempo determinado considerando que está dentro de parámetros operacionales aceptables.

Como se puede apreciar en su definición, la mantenibilidad y la confiabilidad son probabilidades, por lo que se requeriría de un estudio estadístico y estocástico profundo para poder llegar a estimarlos. Es por lo anterior, que se utilizan métricas más sencillas y que van relacionadas con el concepto de los pilares antes mencionados. Estas métricas, son:

- MTBF: Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures), es un promedio entre dos fallas de un elemento, con la condición que se repara luego de la ocurrencia de la falla. Es un indicador asociado a la confiabilidad. Cuando se habla de un sólo ítem, puede expresarse como:

$$MTBF = \frac{T_0 - T_{np}}{Cf} \quad (1)$$

Donde T_0 es el tiempo establecido para operar, T_{np} es el tiempo por paradas no programadas y Cf el número total de fallas detectadas durante el tiempo de operación.

- MTTR: Tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair), es la relación entre el tiempo total de intervenciones por restauración (T_{tr}), y el número de reparaciones (C_f).

$$MTTR = \frac{T_{tr}}{C_f} \quad (2)$$

4.1.5 Costos de mantenimiento

Se ha mencionado con anterioridad que el mantenimiento busca mantener la disponibilidad de equipos y procesos en parámetros aceptables. Ahora bien, es de vital importancia realizar lo anterior al menor costo posible, dado que el mantenimiento vela por aumentar la disponibilidad, de modo que los procesos sean continuos y así se pueda maximizar el EBITDA. *"Por lo tanto, uno de los objetivos principales de Mantenimiento es encontrar la dosis justa de acciones de mantenimiento con el menor gasto total e integral".* (Pistarelli, 2010, p. 607).

Los gastos de mantenimiento pueden agruparse en dos grandes grupos, de acuerdo a tipo de gasto o volumen de actividad. Dentro de los primeros, se encuentra la mano de obra, los materiales, terceros, financieros y consecuencia de fallos. El segundo criterio incluye los segmenta en fijos y variables. A continuación se expondrán cada uno de ellos:

4.1.5.1 Mano de obra

En general, suele ser el mayor gasto del mantenimiento. Es un gasto fijo que depende del volumen de dotación de personal, el cual se encarga de ejecutar las tareas técnicas y administrativas.

4.1.5.2 Materiales

Esta categoría incluye lo referido a repuestos, insumos, herramientas y materiales. Las tareas de mantenimiento requieren generalmente de reemplazo de piezas, ajustes generales con herramientas especializadas, o supervisión con instrumentación adecuada.

4.1.5.3 Terceros

La tercerización es delegar ciertas tareas a organizaciones externas mediante un contrato. En general, tiende a reducir los gastos, y suele ser utilizada en ocasiones como una detención programada, o una parada general de planta, donde se quiere reducir al

máximo posible los tiempos de detención, para lo cual es necesario realizar varias tareas en simultáneo, requiriendo de mayor personal disponible con proveedores especializados.

4.1.5.4 Financieros

Aquí se incluye el gasto por mantener stock de insumos inmovilizado, el costo de amortización o bien instrumentación especializada para tareas de alta complejidad.

4.1.5.5 Consecuencia de los fallos

Los fallos de los equipos traen consecuencias económicas al no funcionar como es debido. Se tiende a producir en menor cantidad y/o con menor calidad, aumentando la tasa de desechos de productos defectuosos o reprocesados. También puede ocurrir que el fallo genere una detención completa de la faena, generándose una pérdida por no producción, dicho de otra manera, es la pérdida de ganancias por no producir lo que se debió y que no se pudo por la falla intempestiva.

4.1.5.6 Costos fijos

Los costos fijos son gastos que debe hacer la organización independiente del volumen de producción. Son gastos fijos las remuneraciones, gastos administrativos, repuestos de uso frecuente o programado, servicios contratados periódicamente, entre otros.

4.1.5.7 Costos variables

Al contrario de los gastos fijos, los costos variables son aquellos que sí dependen de los volúmenes de producción, como las horas extras, repuestos o insumos no previstos, materiales e insumos, entre otros.

4.2 TPM

El Mantenimiento Productivo Total o TPM por sus siglas en inglés, es una filosofía de trabajo empresarial con origen en la industria automotriz de Japón, con la finalidad de mejorar los procesos y alcanzar altos niveles de productividad, abarcando áreas más allá del mantenimiento, requiriendo la participación de todos los sectores de la organización.

En mantenimiento, el TPM abarca dos grandes áreas, las cuales son las tareas administrativas y de gestión, y las tareas tecnológicas de mantenimiento, como se puede ver a continuación:

Figura 4.4: Actividades básicas del mantenimiento en un proceso de TPM

Fuente: Pistarelli, A. (2010) Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.

El objetivo principal de esta metodología es aumentar la eficacia integral de los activos fijos instalados, y con ellos la competitividad y flexibilidad de la empresa, creando un cambio cultural en la organización desde los niveles más altos, hasta los más bajos. Para ello, se hace especial enfoque en la eliminación de pérdidas o defectos, los cuales son:

- Fallas inesperadas del equipo, que producen pérdidas no planificadas de tiempo
- Ajuste de máquinas que generan tiempos muertos
- Marchas en vacío, esperas y detenciones
- Velocidad de operación reducida
- Defectos en el proceso
- Pérdidas de tiempo relacionadas con las puestas en marcha

Así, se generan cuatro grandes objetivos con esta metodología, que resumen la visión del TPM:

- Cero tasa de accidentes e incidentes
- Cero tasa de defectos (calidad)
- Cero tasa de averías (fallas)
- Cero pérdidas

Para lograr lo anterior, la gerencia debe convencer a los colaboradores de que la implementación de TPM es efectiva, y resulta en un cambio cultural positivo para todos quienes participan en la empresa. Así, los colaboradores logran capacidades y habilidades diferentes, la empresa flexibiliza sus procesos, los integrantes del sector de mantenimiento están abiertos al cambio, detectando prematuramente fallas y desvíos, estando presentes en toda la vida útil de los equipos, desde su instalación hasta su obsolescencia. Cabe mencionar que la cultura de trabajo en equipo es vital para poder implementar TPM, compartiendo resultados y no individualizándolos, así todos se sienten parte de los procesos y logros que se van obteniendo.

Como se ha dicho, el Mantenimiento Productivo Total es una metodología que no sólo abarca al área de mantenimiento, sino que busca que toda la organización se involucre en el espíritu de mejora continua y que todos aporten en sus respectivas áreas. Los objetivos para cada área al aplicar TPM están presentes a continuación:

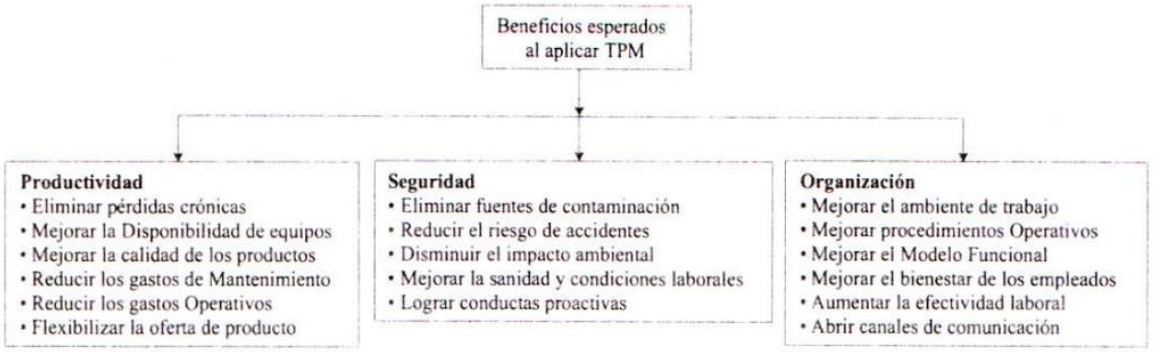


Figura 4.5: Objetivos específicos del TPM según el área de aplicación.

Fuente: Pistarelli, A. (2010). Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.

Para la implementación del TPM se definen los ocho pilares, que permiten focalizar los esfuerzos. Así, cada pilar tiene a su vez pasos, que permiten una implementación ordenada y sistemática de la metodología, las cuales se auditan para poder avanzar de etapa o medir el desempeño de la implementación. Los ocho pilares del TPM son:

- Mantenimiento autónomo
- Mantenimiento planificado
- Mejora enfocada
- Control inicial
- Mantenimiento de la calidad
- Capacitación y educación
- Gestión de los sectores administrativos (RR.HH)
- Seguridad y medio ambiente

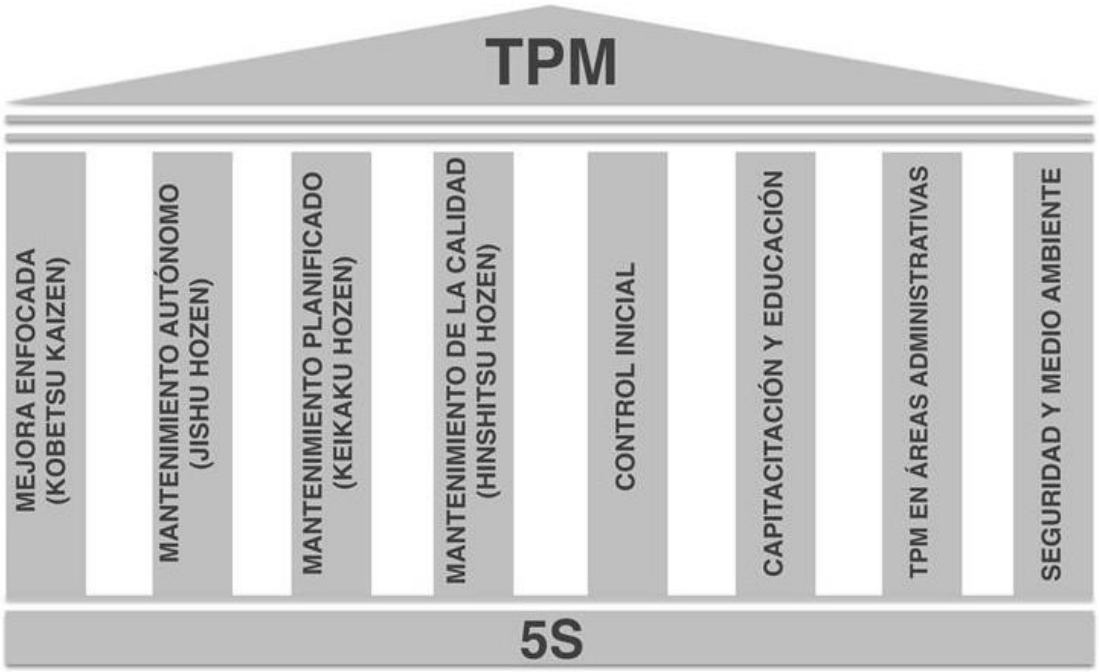


Figura 4.6: Esquema organizacional del TPM

Fuente: Smart thinking. (2020) Comparando Lean 6 Sigma y Total Productive Maintenance. Capítulo 4 (TPM). (https://smart-thinking.com.mx/comparando-lean-6-sigma-y-total-productive-maintenance-tpm-capitulo-4/).

La Figura 4.6 muestra cómo se organiza el TPM, donde se tiene una base común a todos los pilares, que son las 5S, metodología japonesa de mejora continua, seguido de los ocho pilares que en su conjunto, conllevan a la implementación completa del TPM.

4.2.1 Mantenimiento autónomo

El Mantenimiento autónomo (MA), como se pudo apreciar en la sección anterior, forma parte de uno de los ocho pilares a implementar en el TPM, y tiene como principal objetivo alcanzar la autogestión de los operadores, asumiendo inicialmente las responsabilidades sobre los equipos respecto a las labores más sencillas del mantenimiento, como inspección, limpieza, lubricación, purga, ajustes menores e incluso, cambio de piezas cuando sea posible. A medida que las competencias de los operadores aumentan, lo hacen a su vez las responsabilidades de ellos sobre los equipos, adquiriendo así gran protagonismo en la gestión total del sistema.

La situación antes descrita no pretende quitarle protagonismo al área del mantenimiento dentro de la organización, dado que los operadores asumen la ejecución de ciertas tareas, más no la responsabilidad total por los resultados. La eficiencia, eficacia y efectividad del trabajo autónomo sigue siendo responsabilidad del área de mantenimiento, haciendo que estos dediquen más tiempo a la gestión, organización y planificación del mantenimiento.

Otro objetivo que se busca en este pilar, es que los operadores comiencen a ser quienes detectan las fallas en los equipos, dando diagnósticos iniciales de las averías debido a su cercanía con los procesos, reduciendo así el tiempo de reparaciones y aumentando la disponibilidad. Lo anterior da pie, a su vez, a que el personal autónomo proponga mejoras que mejoren la confiabilidad, mantenibilidad o la seguridad del equipo.

Los principales entregables de este pilar son rutinas de inspección, instructivos de trabajo y LUP's (Lecciones de Un Punto) junto con capacitaciones para que los operadores entiendas, conozcan y entiendas los distintos procesos y componentes que puede tener un equipo o proceso al cual se le quiere implementar MA.

Los pasos para implementar MA son los siguientes:

1. Limpieza inicial:

Eliminación profunda de tierra, grasa y elementos obsoletos o innecesarios, generar un entorno seguro para la actividad laboral, capacitación a través de LUP's.

2. Eliminar fuentes de contaminación y lugares de difícil acceso:

Eliminar las condiciones que causan el deterioro acelerado o los riesgos identificados previamente, optimizar los procesos de limpieza, lubricación y ajuste.

3. Establecer estándares de limpieza e inspección:

Mantener la condición básica por medio de estándares de limpieza, gestión visual, rutas de lubricación y/o planes de limpieza.

4. Realizar inspecciones generales de máquina:

Desarrollar operadores competentes en la operación y mantenimiento de los equipos. Extender el uso de controles visuales.

5. Realizar inspecciones generales del proceso:

Desarrollar operadores competentes que comprendan el proceso.

6. Sistematizar el MA:

Introducir normas de calidad y seguridad en la gestión del activo. Crear un sistema para detectar y corregir defectos de calidad.

7. Practicar la autogestión plena:

Consolidar las actividades de mejora alcanzadas en los pasos anteriores. Medir parámetros de confiabilidad y mantenibilidad.

4.2.2 5S

5S es una metodología japonesa de mejora continua destinada a optimizar los lugares de trabajo. Su nombre deriva de los pasos que conlleva en el idioma nipón, los cuales son:

1. Seiri (clasificación / Organización)
2. Seiton (Orden)
3. Seiso (Limpieza)
4. Seiketsu (Aseo)
5. Shitsuke (Disciplina)

La primera S, corresponde a la clasificación de las cosas, es decir, diferenciar entre aquellos elementos que corresponden a un área específica y aquellos que no, como papeles, cajas, carpetas, repuestos, piezas, entre otros, y eliminar aquellos que no corresponden al área donde se está aplicando la metodología.

La segunda S consiste en guardar sólo lo necesario en el área de trabajo, clasificándolo según tamaño, frecuencia de uso o cualquier otro criterio que los encargados consideren pertinente. Un área ordenada permite disminuir los tiempos de búsqueda de elementos, además de una gestión visual adecuada, que permite identificar problemas de manera mucho más rápida. También, el orden y limpieza mejoran el clima laboral y las relaciones entre los colaboradores.

La tercera S consiste en limpiar con profundidad el área para identificar las fuentes de contaminación y eliminarlas, así la limpieza se hace mucho más sencilla. La finalidad de este paso es que sólo exista contaminación natural e inevitable en el área. Para muchos, la limpieza es una tarea de poca importancia, sin embargo, las personas más calificadas técnicamente encuentran en la limpieza la mejor forma de identificar problemas serios (modos de falla) en las máquinas. (Pistarelli, A. 2010).

La cuarta S tiene por objetivo estandarizar el área de trabajo, mediante revisiones periódicas y dejando explícitamente en un documento cómo se debe encontrar el área, con las posiciones de los elementos claramente identificados y guardados en los lugares destinados. Así, se busca lograr la costumbre de mantener limpio y ordenado el lugar de trabajo.

La última S busca asegurar el cumplimiento de todas las normas establecidas, buscando el compromiso de los colaboradores para que ellos mismos sean autosuficientes en el mantenimiento del orden y la limpieza, necesitando de la jefatura sólo la gestión de nuevas mejoras e inspecciones rutinarias.

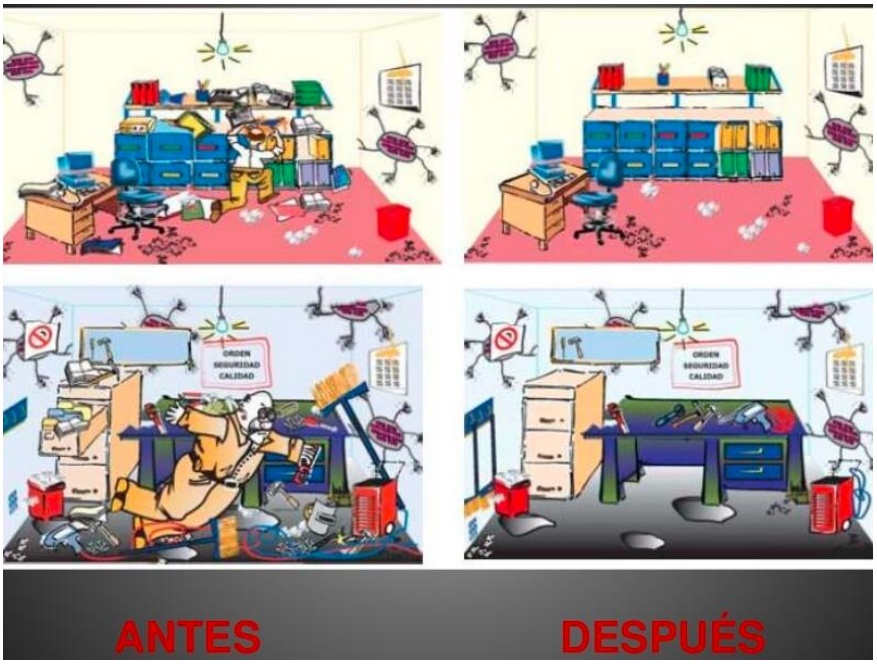


Figura 4.7: Propósito de la implementación de 5S en el área de trabajo.

Fuente: Mouthon, L. (2016) Las 5S. (https://www.slideshare.net/LiviaEstherMouthonSo/las-5s-63874839).

4.2.3 OEE.

La Eficiencia Global de Equipos (Overall Equipment Effectiveness) es un indicador integral de eficiencia que mide el aprovechamiento integral de un equipo, sistema o planta, que considera en sus cálculos los tiempos de detención programada. Este indicador se ve afectado por dos factores principales, los cuales son el Grado de Utilización y la eficacia con que el proceso de fabricación se cumple, y que dependen directamente de la disponibilidad, el rendimiento y la calidad.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la Disponibilidad operacional es el tiempo en que un equipo, sistema o planta esta apta para ser utilizada. Así, la disponibilidad puede ser calculada como:

$$D_O = \frac{T_U - T_{PP} - T_{TPNP}}{T_U} \tag{3}$$

Donde D_O es la disponibilidad operacional, T_U es el tiempo de uso del equipo, sistema o planta, T_{TPNP} el tiempo por paradas no programadas, y T_{PP} el tiempo perdido por paradas programadas.

El Rendimiento mide las pérdidas ocurridas por funcionar a un régimen de marcha inferior al nominal pautado para el equipo, denominado capacidad nominal (C_N) y es la cantidad de producto que teóricamente puede fabricarse por unidad de tiempo, y que no se hace debido a pérdidas como arranques, o hay velocidades bajas de producción. Si se

considera C_{PO} como la cantidad real producida en el tiempo de operación T_O, el rendimiento (R) se puede definir entonces como:

$$R = \frac{C_{PO}}{T_O \cdot C_N} \tag{4}$$

El último factor a considerar para el cálculo del OEE, es el índice de calidad, entendiendo la calidad como la tasa de productos con condiciones aceptables para la comercialización, sobre el total de elementos fabricados, teniendo en cuenta que en todo sistema no ideal, la falla o los productos defectuosos son inherentes a los procesos. Así, el índice de calidad (I_C) puede ser definido como:

$$I_C = \frac{V_A}{V_A + V_{REC} + V_{REP}} \tag{5}$$

Donde V_A es el volumen de producto aceptado, es decir que cumple con las exigencias de calidad que la organización establece como aceptables, V_{REC} el volumen de producto rechazado y V_{REP}el volumen de producto reprocesado. Notar que la suma de los tres productos, representan el volumen total de producción, por lo que I_C podría ser simplemente el volumen de producto aceptado sobre el total producido.

Finalmente, el OEE es la ponderación de los tres factores que influyen en la eficiencia global de equipos. Se debe destacar que los tres factores antes mencionados son adimensionales, y que al ser tasas, son todos menores a 1, por lo que la ponderación de los mismos mantiene dicha adimensionalidad y también es siempre menor que 1.

$$OEE = D_O \cdot R \cdot I_C \tag{6}$$

4.3 RCM

RCM es la sigla de Reliability Centered Manteinance, que significa Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Lo anterior, es otra manera de ver y gestionar el mantenimiento, de forma paralela como lo hace TPM, y con énfasis y objetivos distintos.

De manera inicial, es necesario definir la confiabilidad operacional como la probabilidad de que un equipo, sistema o planta opere adecuadamente un tiempo determinado considerando que está dentro de los parámetros operacionales aceptables. Así, el objetivo principal de la metodología RCM es maximizar la confiabilidad del equipo, sistema o planta.

4.3.1 Norma SAE JA1011

La norma que entrega los criterios de evaluación para los procesos RCM es la SAE JA1011. En ella se explicita que todo proceso de RCM debe seguir 7 pasos esenciales el orden establecido. A esos pasos, también se les conoce como 7 preguntas del RCM, las cuales se exponen a continuación:

1. ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?
2. ¿De qué manera falla en realizar sus funciones?
3. ¿Qué causa el modo de falla?
4. ¿Qué sucede cuando la falla ocurre?
5. ¿De qué forma afecta la falla?
6. ¿Qué puede ser hecho para predecir/prevenir las fallas?
7. ¿Qué puede hacerse si acaso una tarea proactiva no puede ser encontrada?

Las respuestas a las preguntas antes formuladas, pueden ser resueltas mediante distintas técnicas y metodología que RCM ofrece, y que parte por definir las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla, los efectos de la falla, las consecuencias de la falla. Una vez analizado los factores antes mencionados, se deben definir tareas proactivas cuando sea factible y beneficioso, o alguna otra medida cuando lo anterior no sea posible.

4.3.2 Norma SAE JA1012

La norma SAE JA1012 es una guía para el RCM y su eventual implementación. En ella, se toma el proceso entregado por la SAE JA1011, y se detalla en el cómo se deben desarrollar cada una de las etapas o preguntas del mantenimiento centrado en la confiabilidad. Para cada una de las etapas del RCM, se hace un pequeño resumen de lo que se debe hacer según lo expuesto en la norma ya descrita.

4.3.2.1 Funciones

Se debe hacer el levantamiento del contexto operacional, definiendo claramente las funciones de los componentes y definiendo los parámetros de funcionamiento.

4.3.2.2 Fallas

Se deben definir las fallas funcionales para el componente, equipo o sistema, para las cuales no se cumplen los parámetros operacionales aceptables definidos por la organización.

4.3.2.3 Modos de falla

Los modos de falla son todas las posibles causas de los errores mencionados con anterioridad en la sección anterior, donde se deben incluir aquellas causadas por el deterioro o el uso y desgaste natural, las fallas humanas o por desperfectos de diseño.

4.3.2.4 Efectos de la falla

En este paso del RCM se enlistan los efectos de la falla, que describen lo que sucede cuando se presenta cada modo de falla.

4.3.2.5 Consecuencias de la falla

A partir de los efectos de la falla analizados previamente, se evalúan las consecuencias de la falla, en términos de amenaza para la seguridad y medioambiente, de qué modo afecta a la producción o la operación, y que debe hacerse para reparar la falla.

Con el análisis previo, se responde la pregunta 6 del RCM, sobre las tareas proactivas que permiten predecir o prevenir la falla, y que han sido estudiadas con anterioridad en la sección de Mantenimiento (4.1).

La pregunta 7 del RCM entra en acción, cuando en la anterior no ha sido posible encontrar tareas proactivas para el elemento, equipo o sistema. Para ello, se reconocen tres categorías principales. La primera, el descubrimiento de fallas, que implica controlar las funciones periódicamente para determinar si hubo, o hay fallas. La segunda, el rediseño, que implica realizar cambios en la capacidad interna del sistema. Finalmente, el mantenimiento no programado, que implica no realizar ningún gran esfuerzo en anticipar o prevenir modos de fallas, permitiendo la ocurrencia de éstas para luego repararlas. Es decir, y como se ha visto con anterioridad, acudir al mantenimiento de tipo correctivo.

4.3.2.6 Árbol de decisión RCM

El árbol de decisión o diagrama de decisión RCM es una herramienta que resume los pasos ya descritos del RCM, en forma de secuencia lógica donde se describen las fallas, los efectos y consecuencias de las fallas, y las decisiones a tomar considerando la información anterior. Esta herramienta es bastante lúdica, y permite entender de mejor manera cómo actúa RCM en la organización. A continuación se presenta el árbol de decisión RCM.

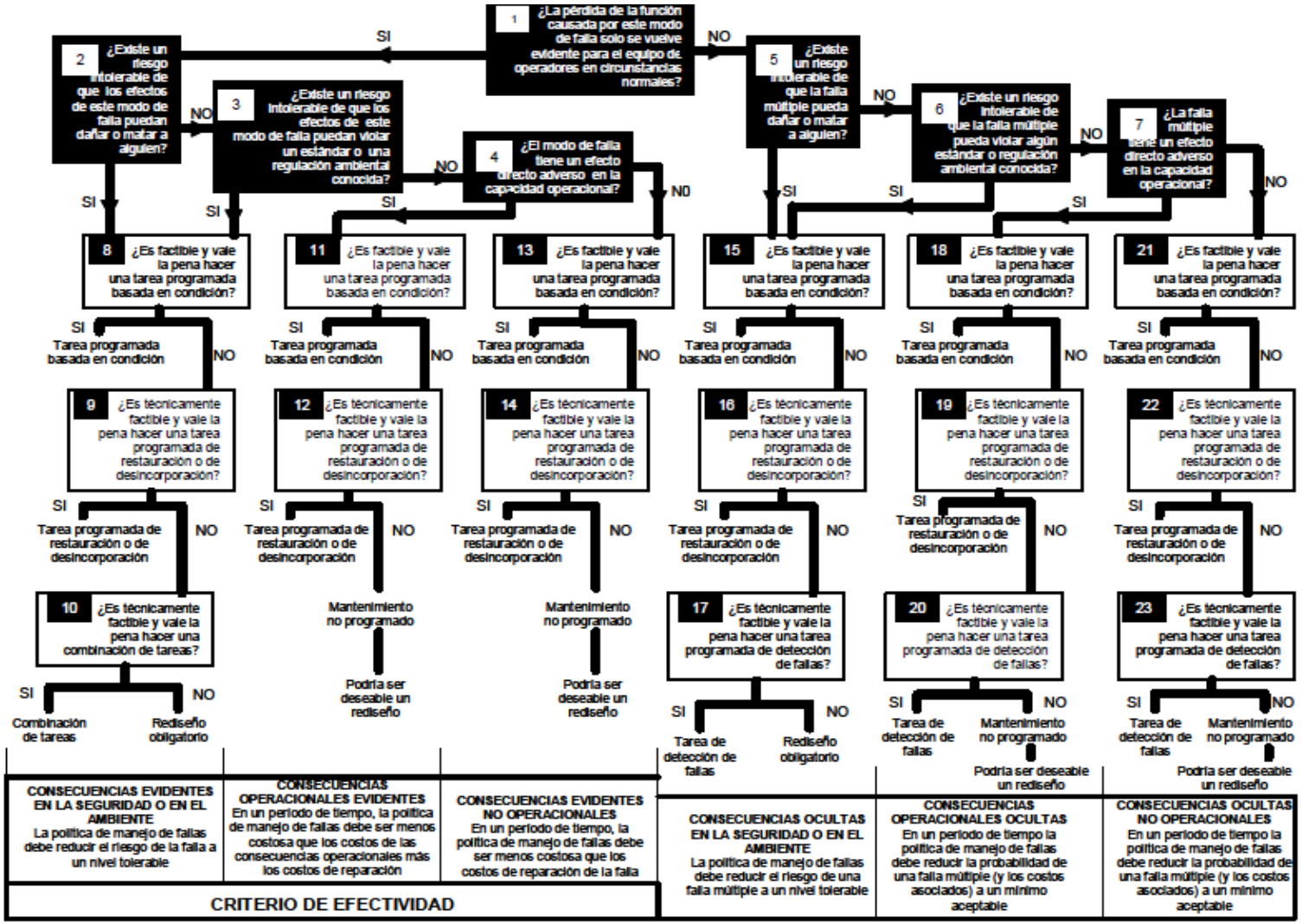


Figura 4.8: Árbol de decisión RCM que resume la metodología de esta herramienta de gestión del mantenimiento.

Fuente: Norma SAE JA-1012:2002.

4.4 Gestión del riesgo

La RAE define riesgo como la posibilidad de que se produzca un contratiempo o una desgracia, de que alguien o algo sufran perjuicio o daño.

Con lo anterior, se puede definir la gestión del riesgo como un enfoque estructurado para manejar la incertidumbre relativa a una amenaza, a través de una secuencia de actividades humanas que incluyen la identificación, el análisis y la evaluación de riesgo, para luego establecer las estrategias de su tratamiento.

La norma ISO 31.000 es una norma internacional que ofrece las directrices y principios generales para gestionar el riesgo de las organizaciones. Este trabajo de título, al encontrarse dentro de un contexto industrial, la gestión del riesgo puede entenderse como las actividades que mitigan y evitan amenazas o catástrofes, no sólo en materia de pérdida de producción, sino que también en materia de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente.

Por ello, el riesgo en la siguiente memoria de título es un eje fundamental a desarrollar, pues el mantenimiento, junto con la operación responsable de los equipos, son pilares fundamentales para manejar los riesgos, cuyas consecuencias pueden desencadenar accidentes fatales y/o emergencias ambientales debidas al tipo de proceso industrial involucrado en la planta.

La norma ISO 31.000 plantea seis pasos para lograr la implementación de la gestión del riesgo, los cuales son:

1. Planificar la evaluación
2. Gestionar la información y desarrollar modelos
3. Aplicar técnicas de evaluación de riesgo
4. Revisar el análisis
5. Aplicar los resultados para apoyar decisiones
6. Registrar el proceso de evaluación de riesgo

En la primera etapa, de planificación, se deben definir los objetivos y el alcance que tendrá la evaluación de riesgo, es decir, el porqué se hace y hasta donde o qué objetos, procesos, equipos, etc. Involucrará. También, se debe definir el contexto en el que se llevará a cabo el estudio de riesgo, considerando factores humanos, organizacionales y sociales.

En el segundo paso, se debe recolectar información, analizar datos y desarrollar y aplicar modelos. Es decir, corresponde a un levantamiento completo de información.

Para aplicar las técnicas de evaluación de riesgo, primero se deben identificar los riesgos, para luego determinar las fuentes y causas. Después, se debe investigar sobre la

efectividad de los controles de riesgo existentes, para luego entender las consecuencias y su probabilidad de ocurrencia.

Para lograr el cuarto paso, se debe verificar y validar los resultados, además de monitorear y revisar los avances. El quinto paso supone la aplicación de los resultados para apoyar las decisiones sobre la importancia del riesgo. Finalmente, el último paso, es registrar y reportar el proceso y los resultados de la evaluación de riesgos.

4.4.1 ISO 31.010

La norma ISO 31.010 es una norma que entrega herramientas prácticas para la identificación, análisis, evaluación y mitigación de los riesgos. Las herramientas de esta norma, buscan dar cumplimiento a los pasos de la ISO 31.000.

A continuación, se mencionan, describen y detallan las herramientas más conocidas e interesantes para el siguiente trabajo de titulo, en cuanto a la identificación, análisis y evaluación de riesgos:

4.4.1.1 Análisis FMEA

La sigla FMEA significa análisis de modos de falla, efectos y criticidad por su definición en inglés (*Failure Modes and Effects Analysis).* Esta herramienta consiste en subdividir un sistema, proceso, equipo, entre otros, en elementos. Luego, para cada elemento se analizan las maneras en que este puede fallar, las causas y los efectos de la misma. Luego, se realiza un análisis de criticidad para definir la significancia de cada modo de falla.

Para cada elemento a estudiar, se debe registrar lo siguiente:

- La función
- Modo de falla
- Los mecanismos que pueden provocar la falla
- La consecuencia de la falla
- Si la falla es dañina o inofensiva
- Cómo y cuando la falla puede ser detectada
- Las disposiciones existentes para compensar la falla

Las fortalezas de utilizar esta herramienta son las siguientes:

- Puede ser aplicada ampliamente para sistemas técnicos y humanos
- Identifica modos de falla, sus causas y efectos, presentándolas de manera simple para su comprensión

- Evita la necesidad de modificaciones costosas en equipos identificando problemas en una temprana etapa de diseño
- Proporciona información para los programas de mantenimiento identificando piezas claves de monitoreo.

Las limitantes de esta herramienta de la ISO 31.010 son:

- Sólo identifica modos de falla particulares, no combinaciones de modos de falla
- Puede ser tedioso y difícil de aplicar para sistemas complejos

4.4.1.2 Matriz de riesgo

La matriz de riesgo es una manera de exponer riesgos de acuerdo a sus consecuencias y probabilidad de ocurrencia, combinando estas características para clasificarlos según su significancia.

Se definen escalas personalizadas para los ejes de la matriz. Estas escalas pueden tener puntos, y pueden ser cualitativos, semi-cuantitativos, o cuantitativos. Si se usa descripción numérica para definir los pasos de las escalas, estos deben ser consistentes con la información y data disponible.

La escala de consecuencias puede representar consecuencias positivas o negativas. La escala debería estar directamente conectada con los objetivos de la organización, y debería abarcar desde la máxima consecuencia hasta la más mínima.

Rating	Financial	Health and safety	Environment and community	Etc.
a	Max credible loss ($)	Multiple fatalities	Irreversible significant harm; community outrage	
b				
c				
d				
e	Minimum of interest ($)	First aid only required	Minor temporary damage	

IEC

Tabla 4.1: Ejemplo de matriz de riesgo que incluye factores económicos, de seguridad y medioambiente.

Fuente: Norma ISO 31.010

La matriz de riesgo necesita ser desarrollada para adecuarse al contexto. Lo anterior requiere de información disponible para poder establecer escalas reales. Lo ideal, es desarrollar la matriz con un equipo que comprenda los riesgos que se están clasificando.

Las ventajas de esta herramienta se mencionan a continuación:

- Es relativamente fácil de usar
- Entrega una clasificación rápida de riesgo en diferentes escalas de significancia
- Entrega una visualización clara de la importancia del riesgo, por sus consecuencias, probabilidad, o nivel de riesgo.
- Puede ser usado para comparar riesgos con diferentes tipos de consecuencias

Algunas limitaciones de esta herramienta son:

- Puede ser difícil definir escalas comunes para aplicar transversalmente a un rango de circunstancias relevantes para la organización.
- La validación de la clasificación de riesgos depende de que tan bien se hayan definido las escalas.
- Es muy subjetivo y suele suceder que para un mismo riesgo, distintas personas le asignen distintas clasificaciones.

4.5 Taxonomía según ISO 14.224

La norma ISO 14.224 estandariza el proceso de recolección de datos para la confiabilidad y mantenimiento en las industrias petrolera, petroquímica y de gas natural. No obstante, es extrapolable a todas las industrias.

Dentro del proceso de toma e intercambio de datos, la norma señala los beneficios de aplicar la recolección de datos para el mantenimiento, cómo medir la calidad de los datos, límites de equipo, taxonomía, definición de tiempos, y datos precisos a tener en cuenta para el control de los equipos. Para el presente trabajo de titulación, resulta interesante lo que señala la norma en cuanto a taxonomía.

La taxonomía es una clasificación sistemática de elementos en grupos genéricos basados en factores comunes (ubicación, uso, equipo, etc.). Así, la taxonomía puede ser representada en forma de pirámide, y muestra la ubicación de un equipo o activo dentro de la organización, como se puede apreciar en la Figura 4.9.

La Figura 4.9 muestra un orden jerárquico de lo que es la industria en la cúspide de la pirámide, seguido de la categoría del negocio, la instalación, la unidad o planta, y finalmente la sección o sistema. Lo anterior, es lo que se define como uso o ubicación. Seguido en la misma pirámide, se aprecia la unidad o equipo, subunidad, componente o elemento mantenible y finalmente la parte. Lo anterior corresponde a la definición de subdivisión de equipo:

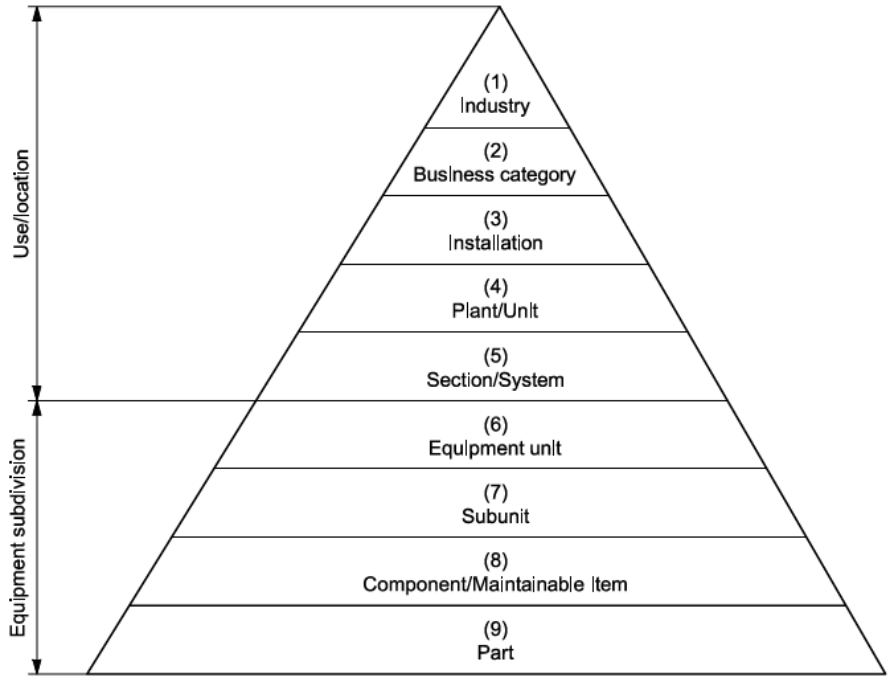


Figura 4.9: Clasificación taxonómica en forma de pirámide.

Fuente: Norma ISO 14.224.

La definición de cada uno de los puntos mencionados anteriormente, puede apreciarse en la Tabla 4.2 junto a ejemplos correspondientes.

Main category	Taxonomic level	Taxonomy hierarchy	Definition	Examples
Use/location data	1	Industry	Type of main industry	Petroleum, natural gas, petrochemical
	2	Business category	Type of business or processing stream	Upstream (E and P), midstream, downstream (refining), petrochemical
	3	Installation category	Type of facility	Oil/gas production, transportation, drilling, LNG, refinery, petrochemical (see Table A.1)
	4	Plant/Unit category	Type of plant/unit	Platform, semi-submersible, hydrocracker, ethylene cracker, polyethylene, acetic acid plant, methanol plant (see Table A.2)
	5	Section/ System	Main section/system of the plant	Compression, natural gas, liquefaction, vacuum gas oil, methanol regeneration, oxidation section, reaction system, distillation section, tanker loading system (see Table A.3)
Equipment subdivision	6	Equipment class/unit	Class of similar equipment units. Each equipment class contains comparable equipment units (e.g. compressors).	Heat exchangers, compressors, piping, pumps, gas turbines, subsea wellhead and X-mas trees, lifeboats, extruders, subsea BOPs (see Table A.4)
	7	Subunit	A subsystem necessary for the equipment unit to function	Lubrication subunit, cooling subunit, control and monitoring, heating subunit, pelletizing subunit, quenching subunit, refrigeration subunit, reflux subunit, distributed control subunit
	8	Component/ Maintainable item (MI) [a]	The group of parts of the equipment unit that are commonly maintained (repaired/ restored) as a whole	Cooler, coupling, gearbox, lubrication oil pump, instrument loop, motor, valve, filter, pressure sensor, temperature sensor, electric circuit
	9	Part [b]	A single piece of equipment	Seal, tube, shell, impeller, gasket, filter plate, bolt, nut, etc.

[a] For some types of equipment, there might not be a MI; e.g. if the equipment class is piping, there might be no MI, but the part could be "elbow".

[b] While this level can be useful in some cases, it is considered optional in this International Standard.

Tabla 4.2: Definición y ejemplos de los niveles de taxonomía.

Fuente: Norma ISO 14.224.

La Tabla 4.2 define cada unos de los niveles expuestos en la Figura 4.9. Así, se tiene que para el primer nivel, es necesario definir el tipo de industria que se está considerando (petróleo, gas natural, petroquímica, etc.). El siguiente nivel corresponde a la categoría del negocio dentro de la industria especificada. El tercer nivel corresponde a definir la categoría de la instalación, por ejemplo si se habla de la industria de gas, podría ser una instalación de perforación, transporte, refinería, etc. El siguiente nivel define el tipo de planta o unidad, como una plataforma, una planta de ácido, metanol, entre otros. El quinto nivel se refiere a la sección o sistema dentro de la instalación. El nivel seis define el tipo de equipo o unidad, por ejemplo un compresor, un intercambiador de calor, turbina, bomba, etc. Dentro del equipo, se encuentra la subunidad, que es un subsistema necesario para el funcionamiento del equipo, como los sistemas de refrigeración o lubricación. Dentro de lo anterior, están los elementos mantenibles, que son el grupo de partes del equipo usualmente mantenidas, como las cajas reductoras, motores, válvulas, sensores, etc. Finalmente se encuentran las partes, que son piezas del equipo como lo son sellos, carcasas, impellers, rodamientos, etc.

Lo anterior, permite un mejor entendimiento del contexto operacional en donde se esté desarrollando la toma de datos, según se afirma en esta norma. Para este caso, y según se afirma en [18]: "*Para realizar RCM, se puede utilizar como insumo la taxonomía, el diagrama de límites de equipo y la subdivisión de equipo que recomienda esta norma".*

El contexto operacional se puede definir como el conjunto de condiciones reales del proceso bajo los cuales se está operando. Así, a partir del análisis taxonómico, diagramas de proceso, entrevistas y acercamientos con el personal en planta, se puede entender de mejor manera las condiciones reales bajo las cuales operan los elementos.

4.6 Osmosis inversa (RO)

La osmosis es un fenómeno natural que consiste en la difusión de un fluido (usualmente agua) a través de una membrana semipermeable, desde una solución de menor concentración de soluto, hacia otra de mayor concentración hasta alcanzar el equilibrio de concentración de soluto en ambos medios. Cuando se alcanza dicho equilibrio, la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana (o medios) es igual a la presión osmótica.

Cuando se aplica una presión por sobre la mencionada presión osmótica, el agua pura fluye desde un medio de mayor concentración hacia otro donde hay menor concentración de soluto, logrando así la separación del agua y del soluto. Lo anterior corresponde al proceso inverso de la osmosis, denominada "osmosis inversa".

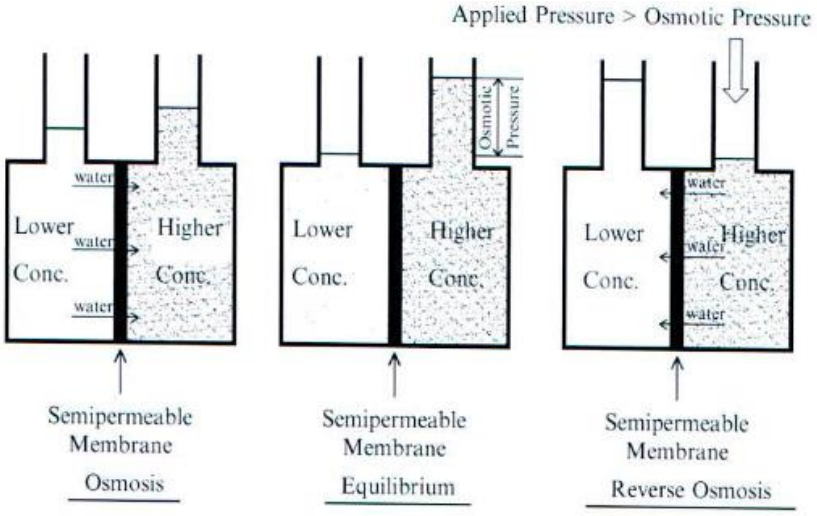


Figura 4.10: De izquierda a derecha, principio de la osmosis, el equilibrio osmótico y la osmosis inversa respectivamente.

Fuente: Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N. (2011) Membrane and desalination technologies.

Ambos procesos son posibles gracias a la membrana semipermeable que separa ambos medios, la cual permite el paso del fluido, pero no del soluto.

Un proceso eficiente de RO se diseña para lograr un alto flujo de agua usando la menor energía posible. Para ello, además de los materiales, se utilizan disposiciones de membranas que permitan lograr tal objetivo, con configuraciones de un paso, dos o más.

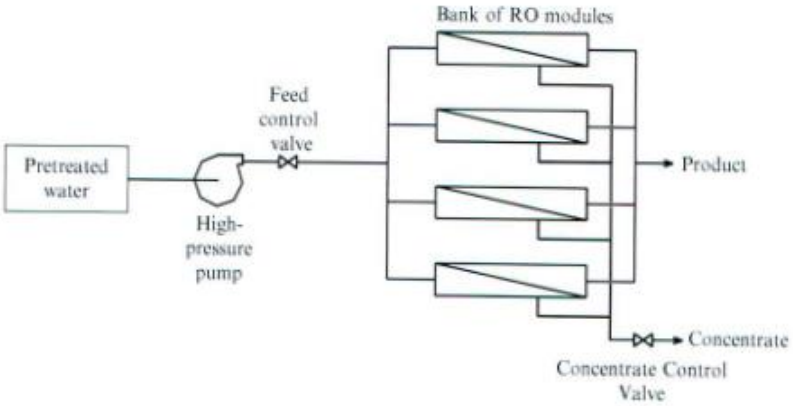


Figura 4.11: Diseño y componentes de una planta de osmosis inversa de un sólo paso.

Fuente: Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N. (2011) Membrane and desalination technologies.

En la Figura 4.11 se aprecia la configuración típica de un sistema de osmosis inversa de un solo paso, la cual inicia desde un estanque de agua pre-tratada (generalmente con procesos de micro filtración), para luego ser presurizada con bomba de alta presión, la cual alimenta en este caso las cuatro membranas, de las cuales se obtiene el producto (agua desmineralizada) y concentrado o rechazo (agua con grandes cantidades de soluto disueltos). En esta configuración, la cantidad de producto depende directamente de la concentración inicial del agua pre-tratada. Cuando se añaden pasos, simplemente se adhieren bancos de tubos después del principal, los cuales son alimentados con el rechazo o concentrado del primer paso, aumentando así la cantidad de producto. Lo anterior requiere, evidentemente, de mayor presión de impulsión, es decir, más gasto energético.

En el contexto industrial, las membranas semipermeables son manufacturadas de materiales polímeros tejidos de modo que cumplan la función antes descrita, y en la cual los solutos se disuelven, haciendo éstas no porosas en teoría.

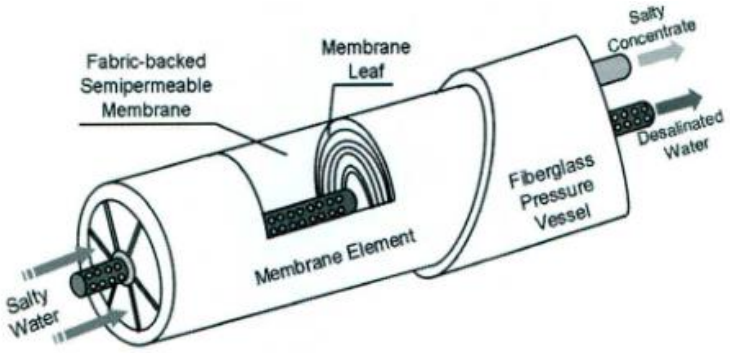


Figura 4.12: Estructura y composición de una típica membrana de osmosis inversa para desalinización de agua.

Fuente: Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N. (2011) Membrane and desalination technologies.

La Figura 4.12 muestra cómo es una membrana de osmosis inversa típicamente usada para un proceso de desalinización de agua. A la izquierda de la imagen, se aprecia la entrada de agua hacia la membrana, la cual está encapsulada por un tubo de material de fibra de vidrio resistente a la presión. La membrana se compone por capas de polímero cilíndricas, las cuales van impidiendo y atrapando las partículas de soluto a medida que el agua avanza de manera radial. Finalmente el agua atraviesa toda la membrana, y es conducida a la tubería de permeado, la cual sale hacia la derecha de manera axial donde ya se encuentra desmineralizada. El rechazo de la membrana también es evacuado a la derecha, pero por fuera de la tubería de permeado. Típicamente el concentrado es rechazado de manera radial a la membrana, siendo fácil así identificar las tuberías de permeado y rechazo, éste último con una gran concentración de soluto disuelto en el fluido.

La falla más típica de las membranas de osmosis inversa, ocurre por la saturación de la misma, debido a que en ella se encuentra una gran cantidad de partículas acumuladas en su superficie, generando en una drástica reducción de agua permeada o producto, calidad de éste, y vida útil del elemento.

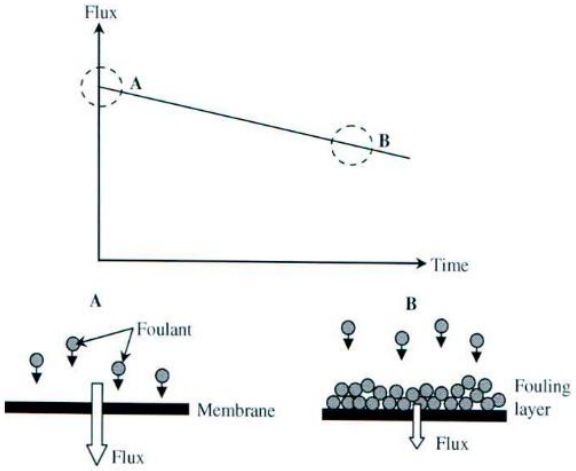


Figura 4.13: Saturación de una membrana de osmosis inversa y su relación con el flujo permeado.

Fuente: Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N. (2011) Membrane and desalination technologies.

En la Figura 4.13 se aprecia cómo el caudal de fluido producido disminuye linealmente a través del tiempo debido a la saturación y acumulación gradual de partículas en la superficie de la membrana (estado B).

Para evitar lo anterior, o más bien aplazarlo y prolongar la vida útil de las membranas, se recomienda siempre realizar pre tratamientos al agua, de modo que ésta posea menor concentración y así se disminuya la carga y el trabajo de las membranas. También, se recomienda retrolavar las membranas o realizar un *flushing*, que consiste en aplicar un flujo a alta velocidad que barra con las capas superiores de soluto sobre la membrana.

Según los autores de *Membrane and desalination technologies*, la limpieza de las membranas debe realizarse cuando el flujo de permeado ha disminuido en un 10% respecto al flujo normal de operación, o bien, cuando se ha aumentado la presión de trabajo entre un 15 a 20% de la nominal. (Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N, 2011). No obstante, cuando esta falla no es controlada de manera adecuada, al punto que la limpieza o retrolavado es ineficaz, se recomienda reemplazar los elementos por otros nuevos.

4.6.1 Indicadores de calidad del agua

El proceso antes mencionado puede ser controlado a través de muchas variables medibles, objetivas y cuantificables. Sin embargo, las principales usadas para este tipo de plantas, son las que siguen:

4.6.1.1 pH

El potencial de hidrógeno, es una medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, indicando la concentración de iones de hidrógeno presentes es una solución. Se realiza a través de un potenciómetro, cuya escala van de 0 a 14, siendo 0 y 14 la acidez y alcalinidad máximas respectivamente. Por consiguiente, un pH de 7 indica neutralidad.

4.6.1.2 Conductividad

La conductividad es la capacidad que tiene un material de dejar pasar a través de él la corriente eléctrica. El agua en su estado puro, es un mal conductor eléctrico, dado que no posee minerales disueltos que son capaces formar iones que sí permiten la conducción eléctrica. Así, se tiene una relación directa entre la salinidad, o la cantidad de minerales disueltos en una solución acuosa, y la conductividad eléctrica. La conductividad se mide en siemens/centímetro [s/cm], y se obtiene midiendo la corriente en un sistema aplicando una diferencia de potencial. A mayor [s/cm], mayor conductividad se obtiene.

Para las mediciones, se utiliza un conductivímetro. A continuación se muestra una tabla con valores típicos de conductividad para distintos tipos de aguas:

Tipo de agua	Conductividad [µS/cm]
Agua pura	0,055
Agua destilada	0,5
Agua de montaña	1
Agua potable doméstica	500-800
Máximo para agua potable	10.055
Agua de mar	52.000

Tabla 4.3: Valores típicos de conductividad para distintos tipos de agua.

Fuente: Hach Company. Conductividad del agua. Recuperado de (https://www.termodinamica.cl/cms-portals/hach_cl/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf).

4.6.1.3 SDI

El SDI (índice de densidad de sedimentos por sus siglas en inglés) da indicaciones sobre la cantidad de partículas que se encuentran en el agua. Se usa frecuentemente en los procesos de nanofiltración, microfiltración y osmosis inversa.

Debido a las partículas presentes en el agua, la velocidad de filtración a través de una membrana se reduce. Así, el SDI es el cambio porcentual medio por minuto de flujo volumétrico a través de una membrana, y se calcula a partir de la tasa de obstrucción de un filtro de membrana con poros de 0,45 [µm] a una presión manométrica constante de 30 [psi].

$$SDI_{15} = \frac{\frac{t_{15} - t_0}{t_{15}}}{15\ [min]} \cdot 100\% \qquad (7)$$

Para determinarlo, se mide el tiempo necesario para pasar a través de una membrana una cantidad de 500 ml, luego de un tiempo establecido, usualmente 15 minutos (SDI_{15}), durante los cuales el agua sigue pasando a través de la membrana, se vuelve a medir el tiempo para llenar los 500 ml.

4.6.1.4 NTU

La unidad nefelométrica de turbidez se utiliza para medir la turbidez de un fluido líquido, y corresponde a la concentración del producto patrón llamado Formacina, utilizando soluciones acuosas de sulfato de Hidracina y Hexametilentetramina en proporciones conocidas para formar el patrón de turbidez de 400 NTU. Para medir, se utiliza un nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

4.7 Bombas

Una bomba es un dispositivo mecánico capaz de desplazar fluido desde un punto a otro aumentando la presión del fluido necesaria para vencer la oposición por fricción, gravedad, entre otros. Existen una gran variedad de bombas, pero cerca del 80% que se utilizan en la industria, son del tipo centrífuga de una etapa. Sin embargo, para este trabajo, también es necesario estudiar las centrífugas multietapas, ya que en el contexto donde se encuentran, este tipo de bombas juegan un rol fundamental.

Figura 4.14: Bomba centrífuga de una etapa a la izquierda, acoplada a un motor eléctrico a la derecha.

Fuente: Motorex. Conoce más sobre las bombas centrífugas. (http://www.motorex.com.pe/blog/conoce-bombas-centrifugas/).

4.7.1 Bomba Centrífuga

Una bomba centrífuga desplaza el fluido a través de un rotor (impeller) ubicado dentro de una carcasa con forma de voluta. El fluido ingresa a la succión, donde se encuentra con el ojo del rotor. La rotación del impeller a altas velocidades, genera fuerza centrífuga que arroja el fluido hacia las paletas del mismo, desplazando así al líquido hacia el diámetro exterior del rotor, o sea, la descarga, a una alta velocidad más alta. Este aumento de velocidad, genera un aumento de la energía cinética del fluido, la cual es transformada en energía de presión causada por el aumento del diámetro en la carcasa de la bomba, dada su forma de voluta, lograndose así el objetivo.

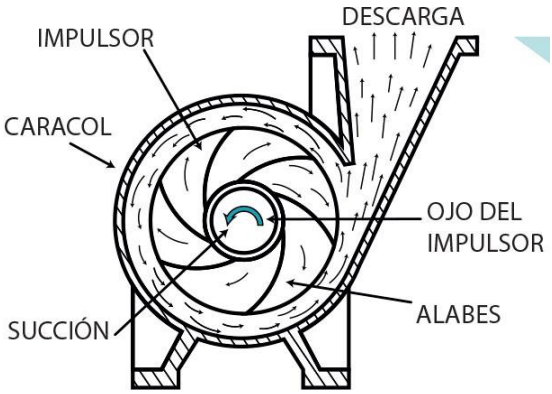


Figura 4.15: Funcionamiento de una bomba centrífuga, donde las flechas indican la dirección del flujo.

Fuente: Revista Cero Grados. (2018). Cavitación de bomba centrífuga. (https://0grados.com.mx/cavitacion-de-bomba-centrifuga/).

Dentro de las variables más importantes a considerar cuando se selecciona una bomba para un sistema, están el caudal que el equipo deberá levantar, la potencia y rpm del equipo, la altura de la bomba, que es el trabajo mecánico útil transferido por la bomba al fluido, la altura total del sistema, que es la altura total requerida a la bomba para mantener un caudal constante en el sistema. Lo anterior se hace de modo que el equipo seleccionado sea eficiente en su labor, bombee el caudal necesario, a la altura y presión requerida, con el menor gasto energético posible.

Un factor importante a considerar, es la cavitación, que es la formación y explosión repentina de burbujas de vapor, debido a que la presión cae por debajo de la presión de vapor cuando el fluido va adquiriendo velocidad. Estas explosiones, van generando daño en el material del rotor, haciendo que este pierda eficiencia a lo largo del tiempo, o en casos más graves, fallen los rodamientos debido al exceso de vibraciones en el equipo. Para evitar aquello, los fabricantes siempre entregan información del NPSH (Net Point Suction Head), o altura neta positiva de aspiración, que es presión en forma de altura mínima que debe tener el fluido en la succión de la bomba. El fabricante entrega el NPSH mínimo requerido para evitar la cavitación, mientras que el ingeniero debe asegurarse que el NPSH disponible en el sistema, sea en todos los escenarios mayor al NPSH requerido.

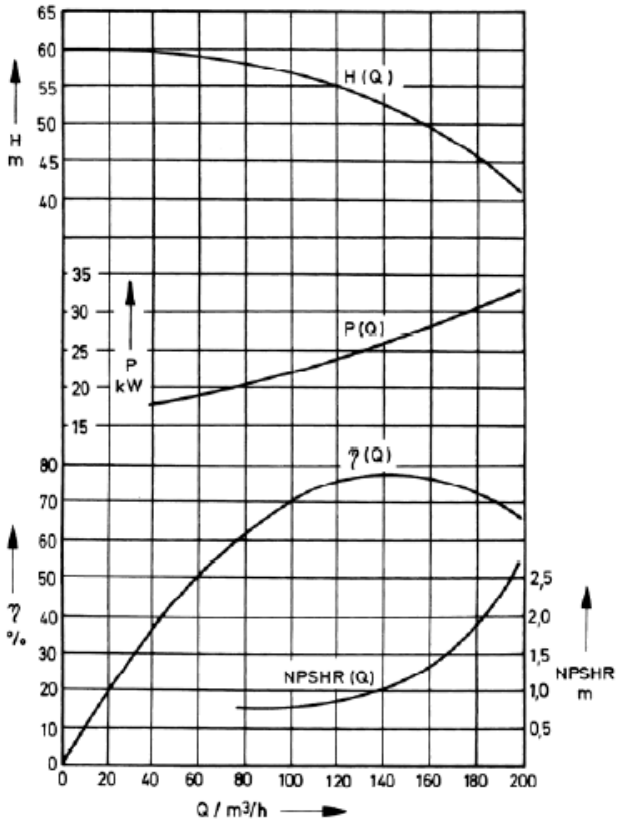


Figura 4.16: Curvas características de una bomba centrifuga de una etapa, con las variables necesarias para la elección de la misma.

Fuente: Sterling Fluid Systems (2003). Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas.

Además de lo descrito anteriormente, las bombas presentan rodamientos, que facilitan la rotación del eje acoplado al impulsor, evitando mayores pérdidas de energía por fricción, además de sellos, que evitan que el fluido escape por la parte posterior del rotor dañando los ejes y/o rodamientos. Dentro de los sellos, existen de diferentes tipos. A continuación se mencionan los más utilizados:

- O'ring
- Sello mecánico
- Empaquetadura
- Prensa estopa

Cada uno de los anteriores presenta ventajas y desventajas, en términos de costos, efectividad, resistencia a la corrosión, entre otros factores. A su vez, los rodamientos tienen la función de sostener el eje, facilitando su movimiento rotatorio para disminuir las cargas por fricción. Además, en la mayoría de las bombas, el rodamiento también cumple la función de contener las cargas axiales generados por la entrada del fluido al rotor, algo no menor ya que no todos los rodamientos tienen esa capacidad. Al igual que en los sellos, existen diversos tipos de rodamientos, cuya elección depende de factores como las fuerzas involucradas, el tamaño del equipo, la mantenibilidad en términos de lubricación, entre otros. Dentro de los principales, se encuentran:

- Buje
- Rodamientos de bola
- Rodamiento de cilindros
- Rodamiento cónico
- Rodamiento axial
- Cojinete de deslizamiento

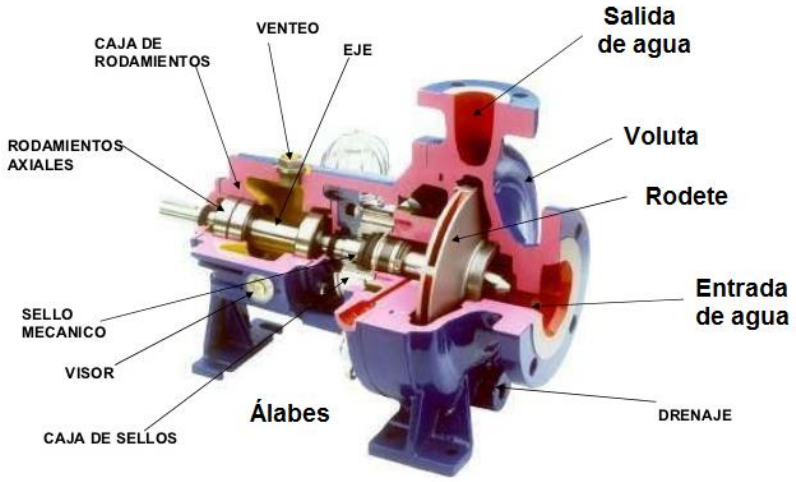


Figura 4.17: Componentes de una bomba centrífuga de una etapa.

Fuente: Portal electromecánico (2019). Curso de máquinas mecánicas, bombas hidráulicas. (http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/BombasHidraulicas/index.html).

4.7.2 Bomba centrífuga vertical multietapa

Las bombas centrífugas vistas, eran horizontales, es decir que el flujo de entrada y salida eran perpendiculares, y de una etapa. Lo anterior, en algunos casos, puede ser un problema cuando hay problemas de espacio, dado que las tuberías requieren de un largo mínimo para poder estabilizar el flujo (usualmente cinco veces la longitud del diámetro). Por ello, existen las bombas verticales, donde la dirección de la entrada del flujo a la bomba es la misma que la salida.

El hecho de que sea multietapa, significa que tienen más de un rodete. Si se habla de una bomba de cinco etapas, por ejemplo, significa que dicho equipo tiene cinco rotores. Lo anterior permite que el fluido alcance mayores presiones, sin necesidad de poner varias bombas en línea, y con un solo motor.

Figura 4.18: Ejemplo de una bomba centrífuga vertical multietapa. En la parte inferior se aprecian las bridas de succión y descarga.

Fuente: Comercial Hidrobombas. Bombas Centrifugas Multietapas Verticales SBI 15-7; 7,5 HP; 380 V. (https://hidrobombas.cl/product/bombas-centrifugas-multietapas-verticales-sbi-15-7-75-hp-380-v/).

El principio de funcionamiento de estas bombas es similar al de una etapa, utilizando la fuerza centrifuga para adquirir velocidad, y luego transformar esa energía cinética en energía de presión. La principal diferencia, es que en lugar de pasar a la brida de salida, el fluido pasa a un rotor contiguo, donde entra con la presión adquirida en la etapa anterior, repite el proceso, y a la salida del segundo impulsor, adquiere una presión mayor que la obtuvo en el primer rotor. Cabe mencionar que el aumento de presión no es el doble, ya que en el proceso ocurre una disminución de la carga por el aumento de velocidad, y se debe considerar las pérdidas por roce.

Cuando el fluido ha alcanzado el último impulsor, el fluido pasa a una camisa unida a la brida de descarga, donde sale con la presión adquirida a través de las distintas etapas de la bomba.

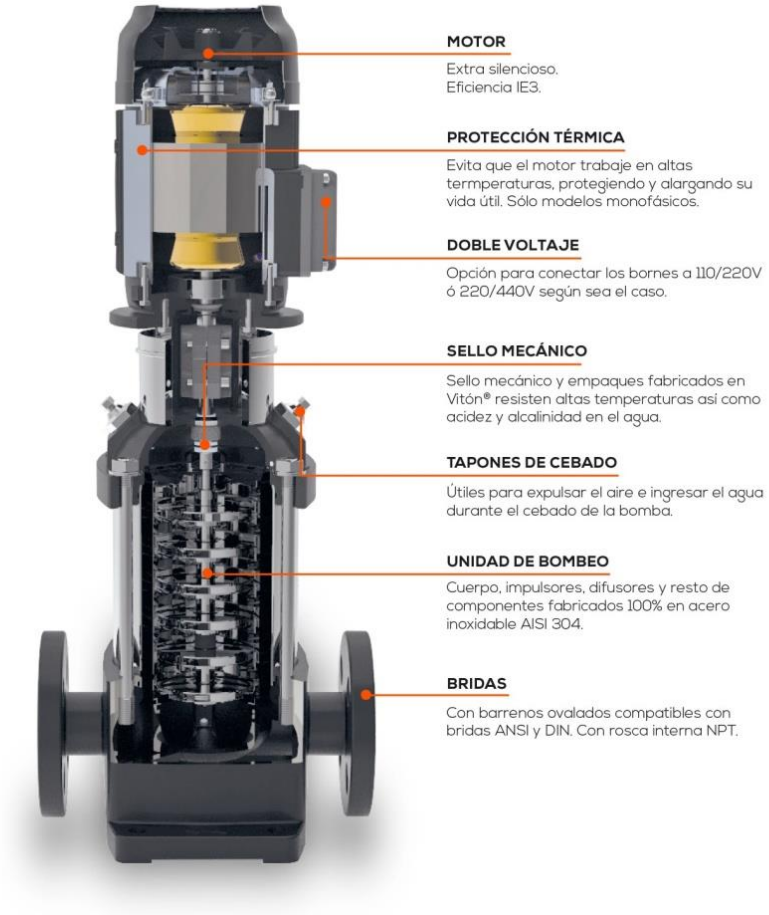


Figura 4.19: Componentes de una bomba vertical multietapa.

Fuente: Evans. Bomba vertical multietapas 5hp. (https://www.evans.com.mx/bombas-de-superficie/industrial/vertical-multietapas-5hp-ssxv25me0500.html).

Como se puede apreciar, estos equipos también requieres de sellos y rodamientos ya vistos en la sección anterior. En general, permiten alcanzar mayores presiones y altura en la descarga, debido a la cantidad de impellers que poseen.

4.8 Compresión de aire

El aire comprimido es un elemento ampliamente utilizado en la industria para distintos propósitos, ya sea para automatización, mediante actuadores neumáticos, control, por medio de instrumentación neumática, o incluso mantenimiento, utilizando herramientas neumáticas. Las principales ventajas del aire comprimido, son:

- Abundante: Su obtención es sencilla, ya que en todo el mundo está disponible.
- Fácil transporte: Fácilmente transportado por tuberías, y no necesita canales de retorno ya que en su mayoría, se devuelve al ambiente.
- Antideflagrante: No hay riesgo de explosión ni de incendio.
- Velocidad: Medio de trabajo rápido permitiendo altas velocidades de trabajo.

Como se puede apreciar, el uso de aire comprimido ofrece variadas ventajas operacionales en una industria. Sin embargo, no está exento de limitantes, mencionadas a continuación:

- Preparación: El aire comprimido debe ser preparado antes de la utilización, eliminando impurezas y humedad para evitar desgaste prematuro de los componentes.
- Fuerza: El uso aire comprimido es rentable sólo hasta cierta fuerza, usualmente dada por una presión de servicio cercana a los 7 [bar], por lo que no es recomendable realizar grandes cargas con este recurso.
- Escape: El escape de aire produce ruido, que puede afectar a la salud de los operadores en el largo plazo. No obstante este problema puede resuelto gracias a los materiales insonorizantes.
- Costos: El aire es una fuente de energía relativamente cara en comparación con otras fuentes como la oleohidráulica.

Un circuito ordinario de aire comprimido se compone principalmente de:

1. Unidad generadora
2. Contenedor o acumulador
3. Unidades de mantenimiento
4. Unidad de control
5. Actuadores y/o consumidores

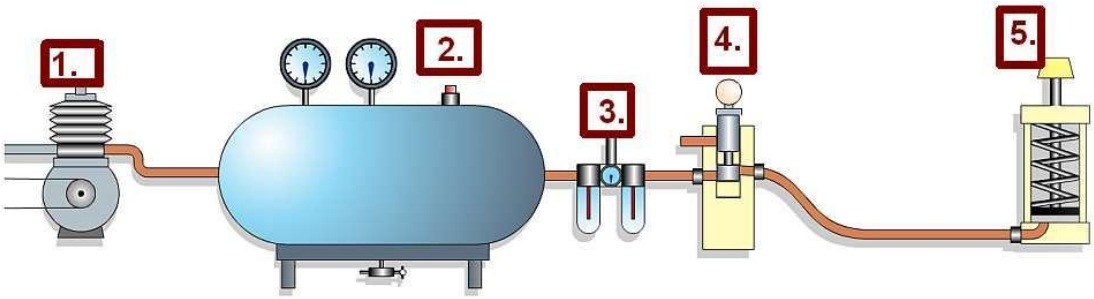


Figura 4.20: Esquema de un sistema ordinario de aire comprimido enumerado según la lista presentada anteriormente.

Fuente: Tecnología Técnica. Sistemas Neumáticos e Hidráulicos. (https://www.tecnologia-tecnica.com.ar/index_archivos/Page4697.htm).

4.8.1 Compresores de tornillo

Los compresores son los componentes principales de toda la cadena de producción de aire comprimido. A nivel industrial, en su gran mayoría, se montan en un recinto especialmente acondicionado, debido a razones de limpieza del aire y refrigeración que requieren estos equipos, sin mencionar el ruido que algunos pueden generar en su funcionamiento.

Las características fundamentales de todo compresor son el caudal suministrado y la presión. El caudal suministrado por el compresor debe adaptarse al consumo general de los distintos elementos de trabajo. En cuanto a la presión, ésta se regula entre valores máximos y mínimos a la salida del equipo por medio de presostatos, que dan arranque al motor cuando se alcanza la presión mínima y detienen el mismo cuando se alcanza la presión máxima. Cabe destacar que este tipo de funcionamiento requiere de acumuladores dimensionados apropiadamente según los consumos, de modo que permita hacer funcionar los elementos sin necesidad de tener el compresor en movimiento.

Un compresor de tornillo aspira aire atmosférico a través de un conducto (1). Al girar los dos tornillos helicoidales (2) y (3) de perfiles de diente cóncavo y convexo, comprimen el aire y lo impulsan hacia la salida (4).

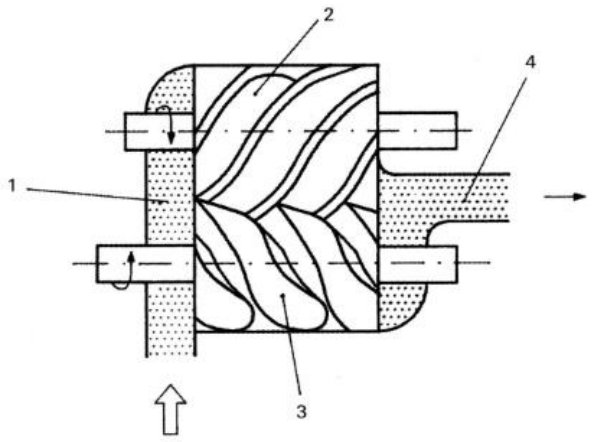


Figura 4.21: Esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo, enumerado según el párrafo anterior.

Fuente: Serrano, A. (2021) Neumática práctica.

Estas unidades requieren además, en general, de lubricación para no desgastar los tornillos y de refrigeración que puede ser por aire, a través de un ventilador, o agua, con un radiador. El uso de uno u otro sistema, depende de las dimensiones y capacidades del equipo.

La principal ventaja de este tipo de compresores, es que no generan más de 75 [dB] medidos a un metro de contaminación acústica (Serrano, N. 2021), algo no menor considerando que el gran problema de estos equipos, son los niveles de ruido que emiten cuando entran en funcionamiento. Además, permiten alcanzar presiones entre 7 y 13 [bar], suficiente para alimentar la mayoría de los elementos con funcionamiento neumático.

Dentro de las desventajas, se encuentra su elevado costo de inversión comparado con otros equipos de esta naturaleza, como los compresores de pistón. Sin embargo, dicha inversión resulta rentable en el largo plazo (Serrano, N. 2021). También se puede mencionar que parte del aceite de lubricación pasa al aire comprimido, y que pese a los filtros sofisticados que se pueden aplicar, estos no son suficientes para evitar la contaminación del aire y por consiguiente, la de los consumidores presentes en la línea neumática.

Como se mencionó con anterioridad, estos equipos requieren de sistemas auxiliares para su funcionamiento, tales como lubricación o refrigeración. Para la lubricación, se requiere de un depósito de aceite que permita dicha tarea, fluido que es impulsado mediante una bomba de aceite al circuito oleohidráulico de lubricación, para luego retornar al depósito, no sin antes haber pasado por un filtro que permita capturar impurezas propias de este tipo de sistemas.

El sistema de refrigeración, tiene por misión mantener un nivel de temperatura óptimo en el equipo, de modo que el aceite, por ejemplo, no pierda sus propiedades de viscosidad por una alza o baja de temperatura, o bien, que el tornillo no sufra una dilatación térmica por un exceso de temperatura. Además, la refrigeración permite enfriar el aire

comprimido en los tornillos, reduciendo la temperatura del mismo, y a la vez, permitiendo obtener humedad inherente al aire atmosférico a través del fenómeno de punto de rocío. La interacción de los sistemas auxiliares y su funcionamiento, queda reflejado en la siguiente figura:

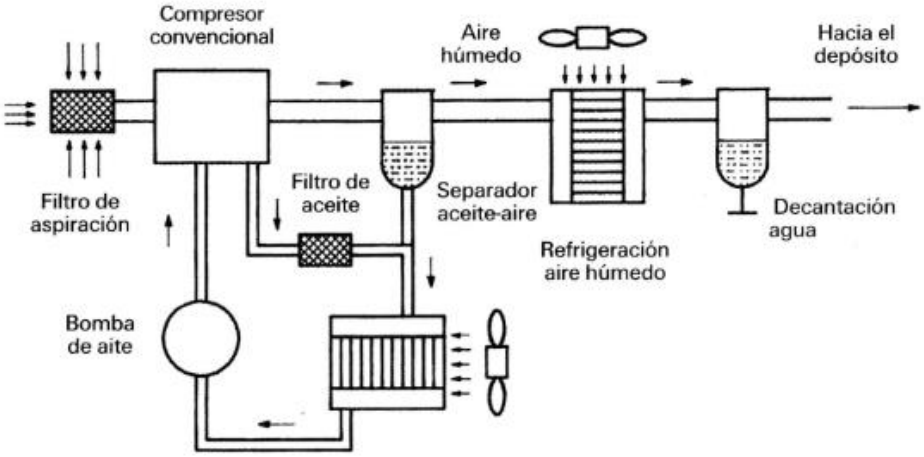


Figura 4.22: Esquema de funcionamiento de los sistemas auxiliares de un compresor de tornillo.

Fuente: Serrano, A. (2021). Neumática práctica.

4.8.2 Acumuladores

Un depósito o acumulador de aire cumple varias funciones dentro de una red neumática. En primer lugar, pueden suplir de aire a los elementos de trabajo durante un tiempo determinado en caso de un apagón eléctrico, otorgándole cierta autonomía al sistema para funcionar con normalidad, o en su defecto, para que dichos elementos comiencen con el proceso de apagado cuando se requiera por una falla eléctrica.

En segundo lugar, evitan los arranques frecuentes a la unidad generadora, acumulando aire a una presión establecida, siendo necesario el arranque del compresor sólo cuando dicha presión baja del valor deseado. A su vez, esto permite absorber las variaciones de presión generadas por equipos de tipo alternativo, como compresores de pistón, y también por las fluctuaciones de los consumidores en la línea.

En tercer lugar, tienen una función térmica. Dado el gran volumen que estos contenedores poseen, permiten la expansión del fluido haciendo que éste descienda en su temperatura, haciendo que, por consiguiente, descienda el punto de rocío del aire, pudiendo así acumular condensado de la poca humedad que ya trae el fluido de trabajo tras haber pasado por un secador. Por este motivo, los acumuladores poseen una purga en el fondo, que puede ser accionada de manera manual o bien automatizada según el nivel de condensado.

La dimensión de este equipo depende de la capacidad del compresor de entregar aire, y del consumo que el sistema neumático tenga. A lo anterior, se deben agregar tolerancias, de modo que se puedan absorber las variaciones de presión ya mencionadas, y poder abastecer ampliamente a los consumidores finales.

Figura 4.23: Acumulador emplazado en una sala de compresores de una central de cogeneración

Fuente: Elaboración propia.

5 Antecedentes generales

La siguiente sección entrega información relevante para entender el contexto en el que se desarrolla la presente memoria de titulación, entregando detalles acerca de la organización, su proceso general y el rol que la planta desmineralizadora tiene en la primera. Además se presenta el proceso detallado del proceso de osmosis inversa, entregando datos técnicos acerca del proceso y los equipos presentes en la misma, lo anterior, en pos de entender el contexto operacional en el que se enmarca el presente trabajo.

5.1 La empresa

Le empresa de generación es una central cogeneradora de energía eléctrica y vapor útil de servicio. Posee una potencia instalada de 15,6 [MW], y su combustible son biomasas principalmente provenientes del rubro agrícola, como podas, carozos, corontas y otros. Sin embargo, también utilizan desechos de la industria maderera, como aserrín, chip, podas urbanas, entre otros.

La empresa comienza sus funciones el año 2010, y nace como una necesidad de su empresa hermana, una papelera que utiliza fardos de cartón reciclado para su proceso, de tener vapor útil para su proceso papelero y reducir costos de energía eléctrica. Ambas empresas pertenecen al Holding común, el cual tiene un fuerte enfoque en el trabajo con residuos y en reprocesar los mismos.

Actualmente la central cuenta con 28 colaboradores, incluido el de mantenimiento. Cabe mencionar que el personal de mantenimiento, corresponde completamente a la papelera, por lo que es válido decir que ésta provee los servicios de mantenimiento. Además se encuentra hace más de un año en un proceso de implementación de herramientas de mejoramiento continuo, a través de la metodología “5S”, y está dentro de sus planes comenzar a implementar el modelo de gestión de Mantenimiento Productivo Total, más conocido como TPM.

En la figura de a continuación se puede apreciar la estructura organizacional de la empresa junto a sus colaboradores:

,

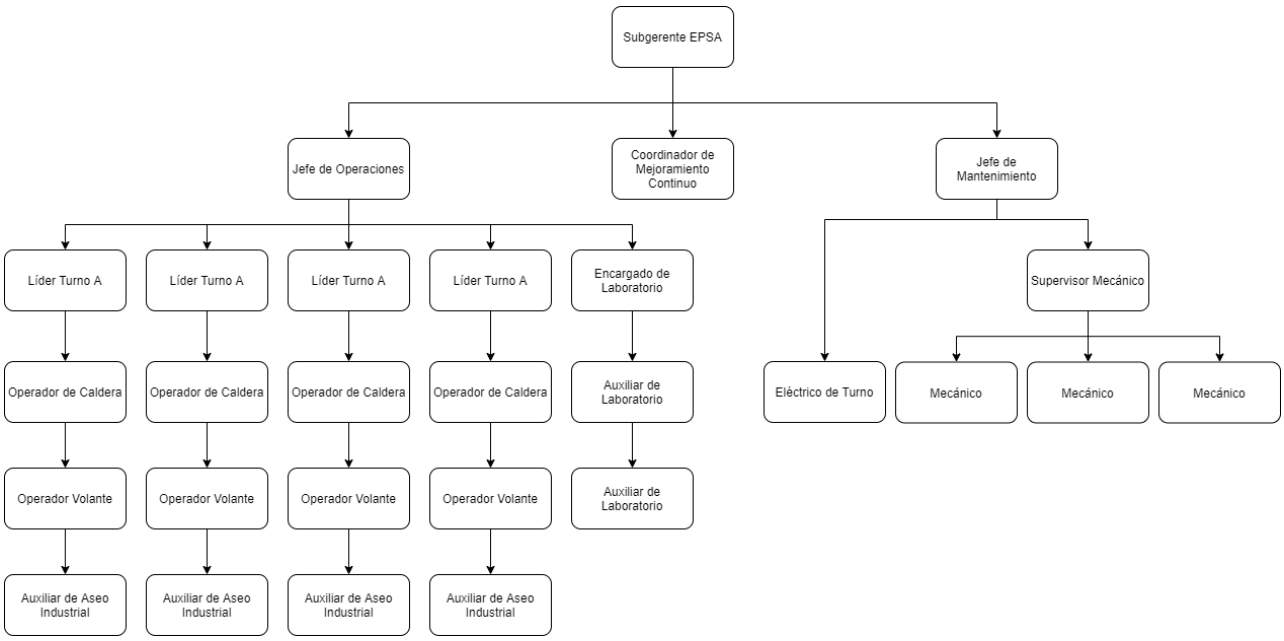


Figura 5.1: Organigrama de la empresa.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Misión

Convocar a la mejor gente para integrar procesos industriales rentables que transformen residuos captados en su origen en productos para los mercados finales.

5.1.2 Visión

Ser expertos en soluciones integrales para la utilización de residuos, anticipándonos a las necesidades del mercado sorprendiendo a nuestros clientes con servicios y productos insuperables.

5.2 El proceso de generación

La central de cogeneración tiene una potencia instalada de l5,6 [MW], la que genera a un voltaje de 15,5 [KV], energía que es enviada a una subestación eléctrica que eleva a 66 [KV] lo generado por la organización. Para el consumo propio, la planta cuenta con transformadores para así consumir parte de la generación propia. El autoconsumo es de aproximadamente 1,5 [MW], y del cual se alimentan los distintos equipos, además de la iluminación y la corriente trifásica y domiciliaria de 380 y 220 [V] respectivamente, a una frecuencia de 50[Hz]. Cerca de 6 [MW] son vendidos a la papelera a través de un contrato de cliente libre. El remanente, alrededor de 8,1 [MW] es vendido al mercado spot, el cual es regulado por el coordinador eléctrico nacional (CEN).

La biomasa utilizada se compone principalmente de biomasas agrícolas de la zona, como carozos de durazno y damasco, corontas de choclo, podas agrícolas, podas urbanas, cáscaras de almendra y nuez, y residuos madereros de la zona central de chile como cortezas, chips, aserrín y astillas, además de desechos sólidos de la papelera como el lodo biológico procedente de su planta de RILES.

El proceso comienza con la llegada del camión con biomasa, el cual es masado en romana, medido con Chip meter para obtener el volumen de carga y calculada su humedad para su aceptación o rechazo. Luego, los cargadores frontales separan los tipos de biomasa, para luego realizar una receta por paladas con las mismas, que son acopiadas, mezcladas y arrojadas a un foso con un transportador de cadenas que a posterior llega a las cintas de transporte. De ahí, pasa por un sistema de limpieza, que consta de un electroimán, que saca metales contenidos en la mezcla, una trampa de piedras y un harnero de disco, para finalmente ingresar al silo de la caldera. En promedio actualmente se consumen alrededor de 20[Ton/h] de combustible. El consumo está fuertemente ligado a la humedad, donde el clima y la estación del año influyen fuertemente.

Una vez en el silo, la biomasa actúa como sello de la caldera tipo acuotubular, para evitar la entrada de aire atmosférico al estar acumulado y tapar la entrada. A través de unos empujadores hidráulicos, la biomasa entra a la primera parrilla de la caldera, donde es secada, luego pasa a la segunda y tercera parrilla donde es combustionada, para finalmente llegar a la cuarta donde se extrae la escoria y ceniza. El hogar de la caldera funciona con una temperatura cercana a los 850 [°C] y una presión negativa de 3 [mm c.d.a.].

Los gases resultantes, son pasados por tres intercambiadores de calor distintos para así aprovechar la temperatura de salida, que son el precalentador de aire, y los economizadores 1 y 2 que elevan la temperatura del agua que ingresa a los tubos de la caldera. Luego, pasan por un filtro multiciclón y un precipitador electroestático que disminuyen la cantidad de material particulado, haciendo que la emanación en la chimenea sea menos contaminante.

El agua utilizada se extrae de un pozo cercano y es llevado a un estanque. De este, se extrae el agua de la torre de enfriamiento que es utilizada para refrigerar el condensador y las unidades hidráulicas de la turbina y la caldera. El flujo que sale de la torre es de aproximadamente 3000 [m^3/h], y sale a alrededor de 20 [°C] y retorna con una temperatura cercana a los 30 [°C]. Además, del estanque se extrae agua industrial y agua de sello, para los cojinetes de distintos equipos.

Gran parte del contenido del estanque de agua no tratada, es ingresada a la planta desmineralizadora que consta de un filtro de carbón activado y una planta de osmosis inversa de dos etapas. De este proceso se obtiene agua con un pH cercano a 7 y una conductividad que oscila entre los 5 y 3 [µS/cm]. Ésta es el agua que luego, ingresa a la bomba de alta presión de 10 etapas, que eleva el agua a una presión de 90[bar], que previamente pasó por un desaireador que elimina el oxígeno disuelto en el líquido y recibe un pequeño tratamiento químico, y que la hace pasar por los economizadores antes mencionados para finalmente llegar al domo de la caldera e ingresar a los tubos de ésta.

Una vez en el domo, el agua ingresa a los tubos de la caldera, donde se eleva a unos 280[°C] y se transforma en vapor saturado. Posterior a ello, vuelve al domo, e ingresa a los tubos de sobrecalentado y aumenta la temperatura a 485[°C], para luego entrar a la turbina con 480[°C] y una presión de 65[bar]. Al expandirse, se extrae vapor a 7,5[bar] y 180[°C] de una de las etapas de la turbomáquina, que es enviado a la papelera. El resto de vapor es completamente expandido en la turbina para finalmente, pasar al condensador, y ser enviado al estanque de retorno de condensado, donde se mezcla con el condensado proveniente de la papelera.

La manera de medir el rendimiento operacional dentro de la empresa es a través de dos KPI's. El primer KPI es Vapor/BDMT, que mide las toneladas de vapor generadas sobre el consumo de biomasa. El segundo es BDMT/MW, que mide cuantas toneladas secas se consumen para generar 1[MW] de energía eléctrica. Así, el primer valor oscila entre 4,5 y 4,7; Mientras que el segundo varía entre 0,9 y 1,1.

A continuación se presenta un diagrama general del proceso que realiza la empresa en sus faenas:

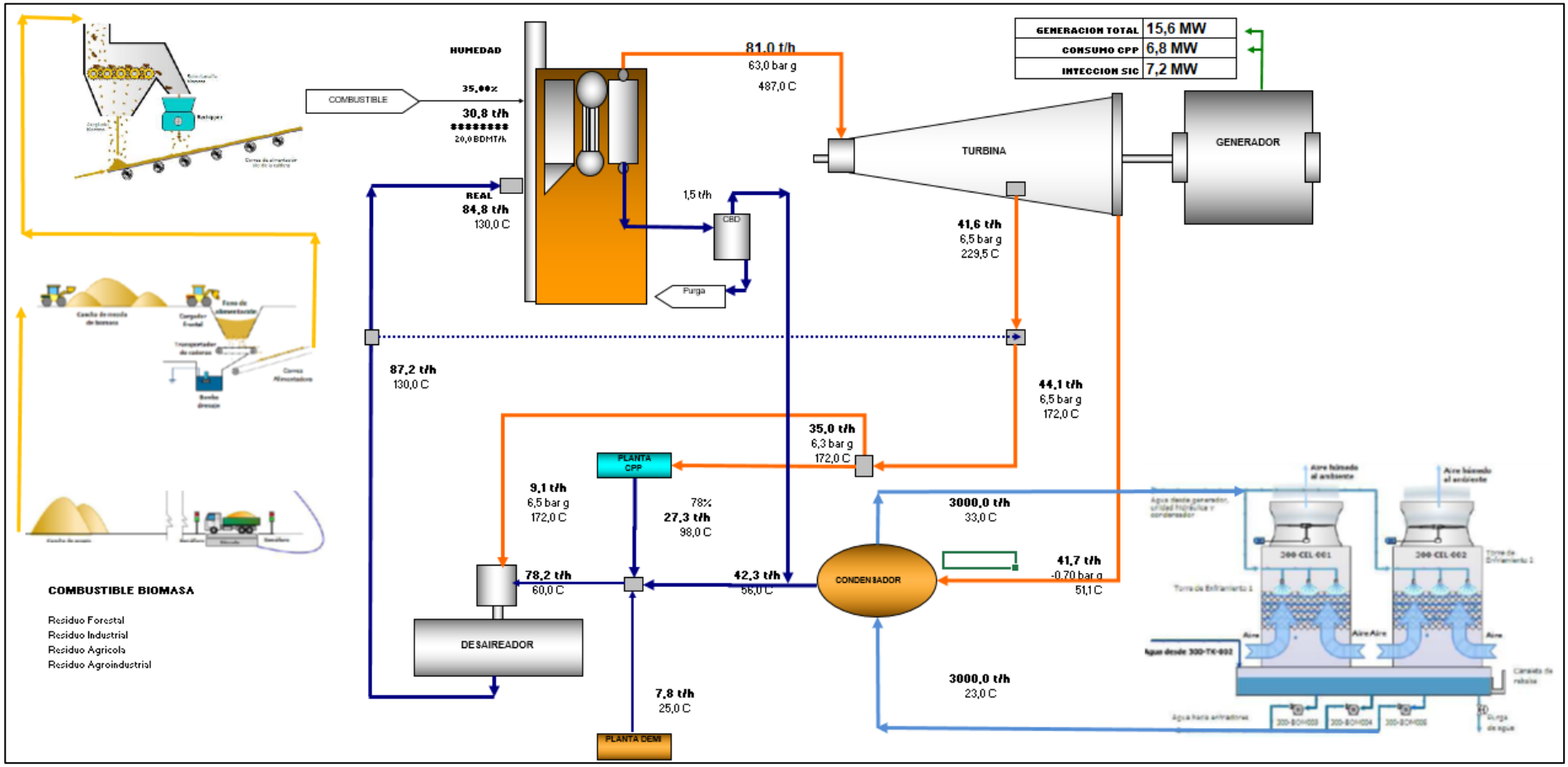


Figura 5.2: Diagrama de proceso de la planta de cogeneración con los valores operacionales más importantes del proceso.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 La planta desmineralizadora

Como se ha dicho con anterioridad, la planta desmineralizadora es la encargada de procesar el agua y dejarla en condiciones operativas óptimas para reponer así las pérdidas de agua inherentes al proceso.

Para ello, la planta extrae agua desde un pozo al interior del recinto, donde se bombea hasta un estanque de agua cruda. El agua ahí almacenada, es en su mayoría destinada a la planta de osmosis inversa, sin embargo, hay un pequeño porcentaje que es usada como agua industrial y agua sello.

Desde el estanque de agua cruda, el agua es bombeada hacia un filtro de carbón activado, el cual tiene por función principal eliminar el cloro disuelto presente en el agua, además de captar las partículas y sedimentos de mayor tamaño, de modo que las membranas de osmosis inversa no sean saturadas tan rápido. Una porción del agua filtrada, va a un estanque para retrolavado, la cual es utilizada para aliviar la saturación en el filtro al hacerla circular a contraflujo. La otra porción sigue su camino hacia otro elemento filtrante. Previo a ello, químico anti-incrustante es dosificado en el agua, esto permite cuidar las membranas y darles una mayor vida útil.

Inmediatamente después, el agua pasa por un filtro de cartucho, donde partículas de orden de una micra de metro son captadas. Tras ello, una bomba vertical de alta presión, bombea el agua hacia la primera etapa de la osmosis inversa en la cual hay cinco membranas. En promedio, el flujo en esta parte del proceso es de aproximadamente 28 [m^3/h]. Primero, el caudal se divide a través de tres membranas, donde el rechazo de éstas, pasa a otro banco de dos membranas. Esto permite optimizar el recurso, ya que aumenta la cantidad de agua permeada y disminuye el rechazo. Así, el total de agua permeada, cercana a 20 [m^3/h], es transportada a un estanque de agua permeada, mientras que el rechazo de la primera etapa, aproximadamente 8 [m^3/h], es llevado a un estanque de neutralización, que luego es tratada en la planta de RILES.

El agua permeada debe luego ser bombeada por una segunda bomba vertical de alta presión, no sin antes dosificarle soda, que ayuda a regular el pH del fluido. El agua así, ingresa a la segunda etapa de las membranas de osmosis inversa, donde hay un total de tres tubos. El flujo medio que entra a esta etapa es cercano a 24 [m^3/h]. Similar a la primera etapa, el caudal de agua se divide en los dos primeros tubos, donde el rechazo de éstos ingresa a un tercer y último tubo. Lo permeado, alrededor de 20 [m^3/h], se dirige hacia el final de la POI que es el estanque de agua desmineralizada, mientras que el rechazo, los 4 [m^3/h] restantes son recirculados a la primera etapa.

La configuración de tubos como es explicada, además de la recirculación del rechazo de la segunda etapa, permite maximizar el recurso hídrico, minimizando así la pérdida de agua.

A continuación se presenta una tabla SIPOC, donde se exponen los principales proveedores, tanto externos como internos del proceso, las entradas, salidas y clientes externos e internos del proceso de desmineralización:

S	I	P	O	C
Papelera	Agua para proceso	Figura 5.3	Agua desmineralizada	Caldera
SEN	Electricidad			
Aguasin Nicolaide	Filtros de cartucho		Agua concentrada	Planta de RILES
Sala de control	Comandos de arranque y detención			
Aguasin	Insumos químicos		Repuestos e insumos usados/desechados	Papelera
Sala de compresores	Aire para control			Empresa de desechos industriales
Operadores	Orden, aseo e inspección			Comunidades

Tabla 5.1: SIPOC del proceso de desmineralización.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.3 complementa el SIPOC de la Tabla 5.1, y en esta se muestra un diagrama de proceso de la planta desmineralizadora con variables y datos relevantes para el proceso:

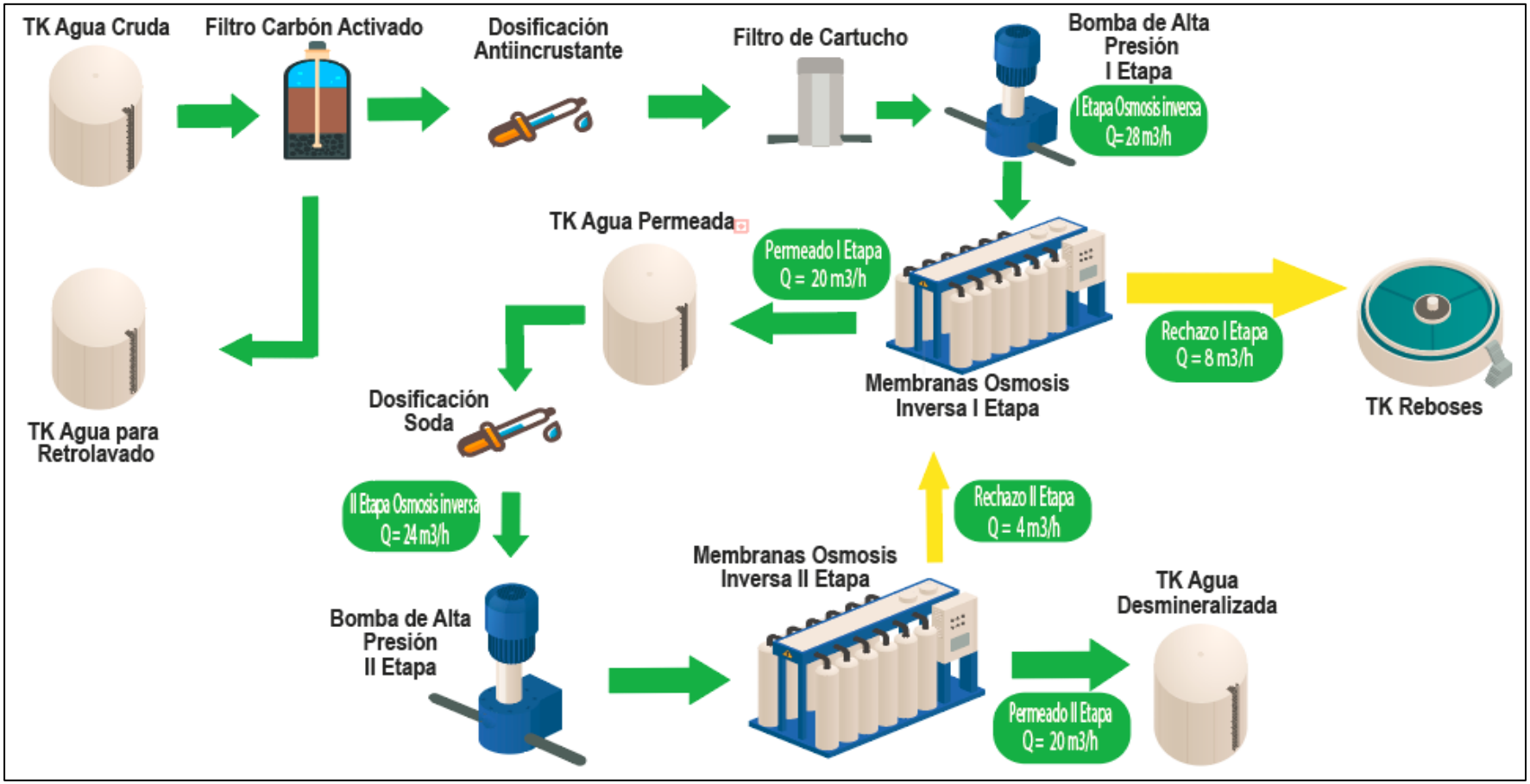


Figura 5.3: Diagrama del proceso de desmineralización del agua con valores de flujos del proceso.

Fuente: Elaboración propia.

El detalle de los componentes, configuraciones y otros, puede ser visto en la Figura 11.1 adjunto en la sección Anexos, donde se muestra el plano P&ID de la planta de osmosis inversa.

5.4 La sala de compresores

Toda la instrumentación de la planta, en particular de la desmineralizadora, depende de un pequeño cuarto de compresores, donde se acumula aire, el cual es utilizado para realizar distintas mediciones a través de instrumentos y sensores.

Esta sala, se ubica físicamente dentro de las instalaciones de la planta desmineralizadora, y debido a las funciones que cumple, es de vital importancia que reciba además un pequeño plan de mantenimiento, considerando que el espacio físico es pequeño, y la cantidad de equipos también es reducida.

El proceso para obtener aire de instrumentación es bastante corto, pues se comienza con dos compresores de tornillo en paralelo, los cuales van comprimiendo el aire ambiental para suministrarlo a la línea de aire. Luego, existen dos filtros, uno para condensado de aceite y otro para condensado de agua. Después, el aire es tratado en unos secadores que retienen la humedad presente en el fluido, de modo que quede apto para su utilización. Finalmente el aire es contenido en dos acumuladores a una presión de 7[bar].

A continuación se presenta un diagrama del proceso de tratamiento de aire:

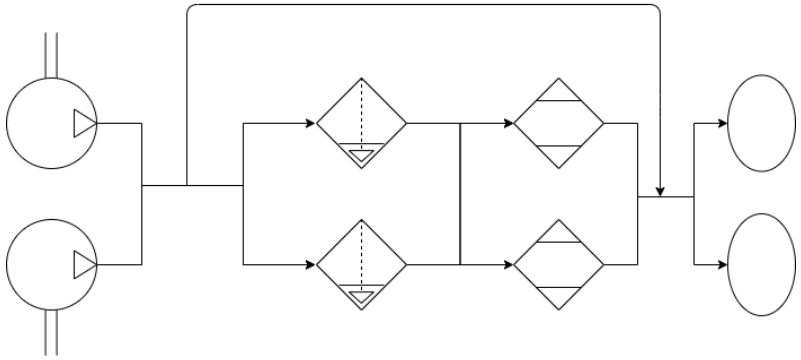


Figura 5.4: Diagrama del proceso de compresión de aire necesario para toda la planta.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Listado de equipos

En esta sección, se presentarán los listados de los equipos presentes en la planta desmineralizadora obtenidos a partir del levantamiento en terreno realizado por el autor al momento de comenzar su trabajo de título.

5.5.1 Sala de compresores

EQUIPO	TAG	Marca	Modelo	CANTIDAD	OBSERVACIÓN
Compresor	600-COM-001	Kaeser	SM9	-	-
Compresor	600-COM-002	Kaeser	SM9	-	-
Filtros	-	Kaeser	-	4	-
Secador	600-SEC-001	Kaeser	-	-	-
Secador	600-SEC-002	Kaeser	-	-	-
Acumulador	-	OKS	1000L	2	-
Manómetros	-	-	-	2	Falta gestión visual
Válvulas de bola	-	V.I.S.A.	-	12	No cortan aire

Tabla 5.2: Listado de equipos de la sala de compresores.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2 Equipos POI

Equipo	TAG	Marca	Modelo	Observación
Estanque de agua cruda	300-TK-002	Manec	40 m3	-
Bomba agua cruda	300-BOM-008	SIHI	ZLND 040200 AC BJ3 0B 2	-
Bomba agua cruda stand by	300-BOM-009	SIHI	ZLND 040200 AC BJ3 0B 2	-
Filtro carbón activado	CAA-210	Aguasin	-	-
Estanque retrolavado	TK-01	Fibra	20 m3	-
Bomba de retrolavado	GMB-01	Vogt	NE 626 BMRS / 155	-
Filtro de cartucho	-	Aguasin		-
Bomba de alta presión 1° etapa	GMB-02	Grundfos	A96941989P10911	-
Membranas 1° etapa	-	Hydranautics	PRO-8-300-SP	Ver fugas
Estanque permeato	TK-02	Fibra	30 m3	
Bomba de alta presión 2° etapa	GMB-03	KSB	Movitec VF 25/10 B	Cambio de marca
Membranas 2° etapa	-	Hydranautics	PRO-8-300-SP	Ver fugas
Estanque agua desmi	300-TK-001	Manec	80 3	

Tabla 5.3: Listado de equipos más importantes de la POI.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.3 Válvulas automáticas POI

EQUIPO	TAG	Tipo	Marca	Observación
Valvula de alimentación filtro CAA210	VA01	Mariposa	Valbia	Cambio de marca
Válvula servicio filtro CAA210	VA02	Mariposa	Bray	Falta tag
Válvula de alimentación retrolavado filtro CAA210	VA03	Mariposa	Valbia	Cambio de marca
Válvula desagüe retrolavado filtro CAA210	VA04	Mariposa	Valbia	Cambio de marca
Válvula desagüe lavado filtro CAA210	VA05	Mariposa	Bray	Falta tag
Válvula llenado tk retrolavado	VA06	Bola	Valbia	con pasada
Válvula alimentación GMB02	VA07	Mariposa	Valbia	Falta indicador
Válvula flushing OR N°1	VA08	Mariposa	burkert	Mejorar tag
Válvula alimentación GMB03	VA09	Mariposa	Valbia	Falta tag
Valvula flushing OR N°2	VA10	Mariposa	burkert	
Válvula servicio agua desmineralizada	VA11	Mariposa	Power genex / Interapp	Falta tag
Válvula recirculacion permeato OR N°2 a tk intermedio	VA12	Mariposa	Valbia	

Tabla 5.4: Listado de válvulas automáticas presentes en la POI.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.4 Válvulas manuales POI

EQUIPO	TAG	Tipo	Marca	Observación
Válvula succión tk agua cruda	-	Mariposa	Mueller	Falta TAG
Válvulas succión bomba agua cruda	-	Mariposa	Mueller	Falta TAG
Válvulas retención descarga bomba agua cruda	-	Retención	Davis	Falta TAG
Válvulas descarga bomba agua cruda	-	Mariposa	Mueller	Falta TAG
Válvula succión GMB01	VM01	Mariposa	Bray Controls	Con pasada
válvula descarga GMB01	VM02	Mariposa	Bray Controls	
Válvula de alimentación filtro cartucho	VM03	Mariposa	Bray Controls	
Válvula de descarga filtro cartucho	VM04	Mariposa	Bray Controls	
Válvula SDI	VM05	Bola		TAG no visible / cambio de marca
Válvula SDI	VM06	Aguja		TAG no visible / no se sabe marca
Válvula succión GMB02	VM07	Mariposa	Bray Controls	TAG no visible
Válvula alimentación OR1, full inox	VM08	Bola	Spirax Sarco	TAG no visible / INOX?
Válvula flushing OR1	VM09	Aguja	Genebre	Cambio de marca
Válvula succión GMB03	VM10	Mariposa	Bray Controls	TAG no visible
Válvula alimentación OR2, full inox	VM11	Bola	Spirax Sarco	
Válvula flushing OR2	VM12	Aguja		No se ve marca
Válvula retención descarga GMB03	VR01	Retención		TAG no visible / no se sabe marca
Válvula retención alimentación OR1, full inox	VR02	Retención	Spirax Sarco	TAG no visible
Válvula retención servicio OR1	VR03	Retención	Us Valve	
Válvula retención alimentación OR2, full inox	VR04	Retención	Spirax Sarco	TAG no visible
Válvula retención servicio OR2	VR05	Retención	US valve	

Tabla 5.5: Listado de válvulas manuales presentes en la POI

Fuente: Elaboración propia.

5.5.5 Instrumentos POI

Equipo	TAG	Señal PLC
Sensor de flujo alimentación filtro CAA	FE01	FT01
Sensor de nivel estanque retrolavado	LIT01	LT01
Interruptor baja presión alimentación planta	PS01	PSL01
Sensor de conductividad alimentación 1° etapa	CE01	CT01
Sensor de nivel estanque anti-incrustante	LS01	LSL01
Interruptor baja presión GMB02	PS02	PSL02
Sensor de alta presión GMB02	PE01	PT01
Sensor de flujo permeato 1° etapa	FE02	FT02
Sensor de conductividad permeato 1° etapa	CE02	CT02
Sensor de flujo rechazo 1° etapa	FE03	FT03
Sensor nivel de estanque permeato	LIT02	LT02
Interruptor baja presión alimentación 2° etapa	PS03	PSL03
Sensor de pH	pH01	pht01
Sensor de nivel estanque de soda	LS02	LSL02
Sensor de alta presión GMB03	PE02	PT02
Sensor de flujo permeato 2° etapa	FE04	FT04
Sensor de conductividad permeato 2° etapa	CE03	CT03
Sensor de flujo de rechazo 2° etapa	FE05	FT05
Sensor de ORP	ORP01	ORP01
Bomba dosificadora de anti-incrustante	BD01	BD01
Bomba dosificadora de soda	BD02	BD02
Presóstato diferencial de presion filtro cartuchos	DPS01	DPS01

Tabla 5.6: Instrumentación de la POI

Fuente: Elaboración propia.

5.5.6 Indicadores POI

Descripción	TAG	Marca	Observación
Manómetro presión de retrolavado (0-100PSI)	PI01	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro presión de entrada filtro CAA (0 - 100 PSI)	PI02	Ashcroft	
Manómetro presión de salida filtro CAA (0 - 100 PSI)	PI03	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro SDI (0 - 60 PSI)	PI04	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro presión de entrada 1° etapa (0 - 600 PSI)	PI05	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro presión de rechazo 1° etapa (0-600 PSI)	PI06	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro presión de salida 1° etapa (0 - 100 PSI)	PI07	Ashcroft	Falta gestión visual/malo
Manómetro presión de entrada 2° etapa (0 - 400 PSI)	PI08	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro preisón de rechazo 2° etapa (0 - 400 PSI)	PI09	Ashcroft	Falta gestión visual
Manómetro presión de entrada filtro cartucho (0 - 100 PSI)	PI10	BTU	Falta TAG/Gestión visual
Manómetro presión de salida filtro cartucho (0 - 100 PSI)	PI11	BTU	Falta TAG/Gestión visual
Switch presión de entrada filtro CAA	PS01	Ashcroft	
Switch baja presión entrada 1° etapa	PS02	Ashcroft	
Switch baja presión entrada 2° etapa	PS03	Ashcroft	No está
Switch de presión diferencial filtro de cartucho	DPS01	Ashcroft	

Tabla 5.7: Listado de indicadores de la POI con las observaciones encontradas

Fuente: Elaboración propia.

6 Criticidad

La sección de criticidad tiene por objetivo principal realizar el análisis de criticidad del proceso y los equipos presentes en el mismo, para poder jerarquizarlos de la manera más objetiva posible, y así, enfocar los recursos hacia aquellos elementos cruciales dentro del proceso, valiéndose el autor de las distintas herramientas presentes en el Marco Teórico (Sección 4).

6.1 Contexto operacional

A partir de la sección 5 de Antecedentes Generales, se puede clasificar el área de trabajo según la definición de taxonomía que entrega la ISO 14.224. Como se pudo apreciar, se trabajará sólo en la planta desmineralizadora y la sala de compresores de esta central de cogeneración. Lo anterior permite definir el alcance de este trabajo, y darle un contexto operativo en términos del rubro en el que se trabaja. Lo anterior, se ve reflejado en la Figura 6.1 presente a continuación:

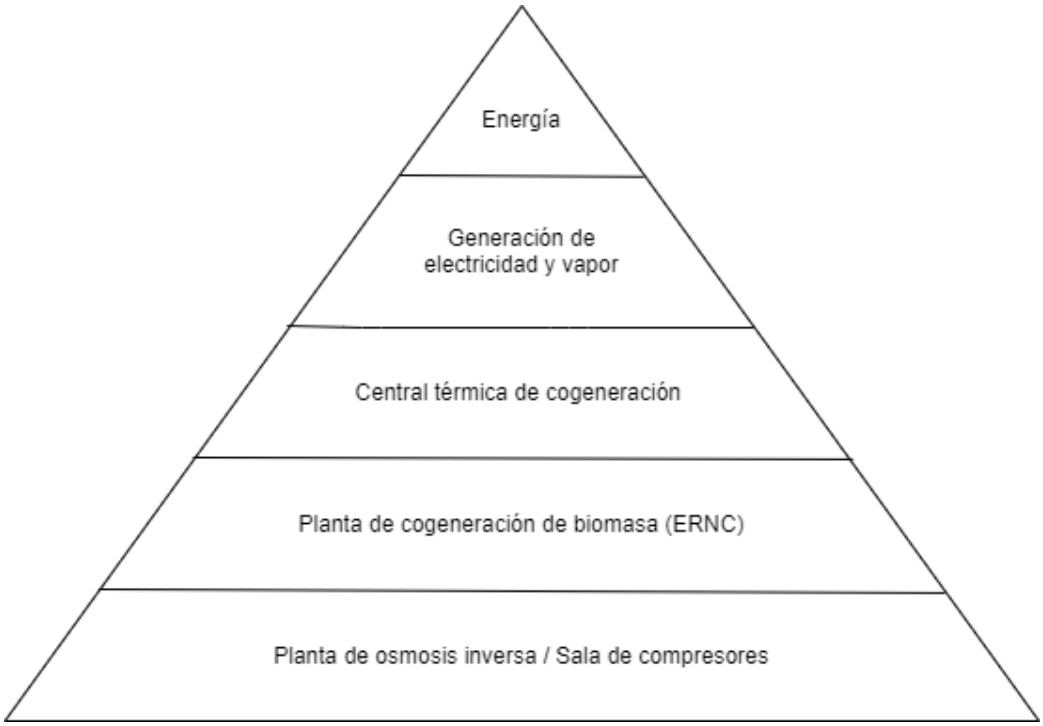


Figura 6.1: Taxonomía del lugar de aplicación del siguiente trabajo de titulación según ISO 14.224.

Fuente: Elaboración propia.

Un factor muy importante a considerar en el presente trabajo de título, es el contexto operacional. De manera inicial, y como se pudo apreciar en el levantamiento de información, se estudiará el proceso de desmineralización de agua y el sistema de tratamiento de aire para la instrumentación de la primera. Dicho lo anterior, es necesario explicitar que los fluidos de trabajo son agua cruda proveniente de pozo, agua desmineralizada y aire.

	VARIABLE	MEDICIÓN
POZO	pH	6,90
	Temperatura [°C]	18,6
	Conductividad [µS/cm]	300
	NTU	0,90
SALIDA FILTRO CARBON	pH	6,81
	Temperatura [°C]	18,4
	Conductividad [µS/cm]	300
	Presión Entrada [bar]	6
	Presión Salida [bar]	6
	NTU	1
PRIMERA ETAPA		
ENTRADA	CAUDAL (Q) [m^3/h]	26,58
	pH	6,73
	Temperatura [°C]	18,3
	Conductividad [µS/cm]	300
	Sílice Alto Rango ppm	**40,70**
	NTU ETAPA 1	0,48
	Presión de [bar]	8
PERMEADO	CAUDAL (Q) [m^3/h]	24,53
	pH	6,17
	Temperatura [°C]	18,4

	Conductividad [µS/cm]	20,00
	Presión de salida[Bar]	-
RECHAZO	**CAUDAL (Q) salida [m^3/h]**	8,57
	pH	7,20
	Conductividad [µS/cm]	1400
	Presión de Rechazo [psi]	6
	Temperatura [°C]	18,5
SEGUNDA ETAPA		
ENTRADA	**CAUDAL (Q) [m^3/h]**	-
	pH	7,43
	Temperatura [°C]	18,3
	Conductividad [µS/cm]	12,00
	Presión de Entrada [bar]	16
PERMEADO	**CAUDAL (Q) [m^3/h]**	20,36
	Sílice (ppm)	0,04
	pH	6,14
	Temperatura [°C]	18,5
	Conductividad [µS/cm]	4,20
RECHAZO	**CAUDAL (Q) [m^3/h]**	3,68
	pH	6,78
	Temperatura [°C]	18,5
	Conductividad [µS/cm]	140
	Presión de Rechazo [bar]	-

Tabla 6.1: Indicadores operacionales del agua de desmineralización en sus distintas etapas.

Fuente: Elaboración propia.

	VARIABLE
POZO	pH
	Temperatura
	Conductividad uS/cm2

	NTU
SALIDA FILTRO CARBON	pH
	Temperatura
	Conductividad uS/cm2
	Presion Entrada Filtro Bar
	Presion Salida Filtro Bar
	NTU
PRIMERA ETAPA	
ENTRADA	CAUDAL (Q) entrada
	pH
	Temperatura
	Conductividad uS/cm2
	Silice Alto Rango ppm
	NTU ETAPA 1
	Presión de Entrada PSI
PERMEADO	CAUDAL (Q) Salida
	pH
	Temperatura
	Conductividad uS/cm2
	Presión de Salida Bar
RECHAZO	CAUDAL (Q) salida
	pH
	Conductividad
	Presión de Rechazo PSI
	Temperatura
SEGUNDA ETAPA	
ENTRADA	CAUDAL (Q) entrada m3/hr
	pH
	Temperatura
	Conductividad
	Presión de Entrada
PERMEADO	CAUDAL (Q) entrada m3/hr
	Dureza CO3 ppm
	Silice (ppm)

	pH
	Temperatura
	Conductividad
RECHAZO	CAUDAL (Q) entrada m3/hr
	pH
	Conductividad
	Temperatura
	Presión de Rechazo

La Tabla 6.1 superior corresponde al estudio habitual que el laboratorio de la empresa hace periódicamente al agua de la planta desmineralizadora en sus distintas etapas. Cabe mencionar que el laboratorio también realiza mediciones periódicas al condensado de la turbina y de la papelera, y al agua de alimentación de la caldera, para tener control sobre la calidad del fluido de trabajo, y así poder tomar acciones cuando parámetros como la sílice o el hierro se elevan por sobre lo normal. Además el laboratorio estudia muestras de biomasa, caracterizando principalmente la humedad.

Como se puede apreciar en la Tabla 6.1, la calidad del agua de pozo es bastante buena, considerando que proviene de napas subterráneas. Se puede apreciar que ésta posee un NTU de 0,9, y una conductividad de 300 [µS/cm], lo que según la Tabla 4.2 correspondería a un agua con igual concentración de sales que el agua potable de los hogares.

En general las temperaturas en el proceso de tratamiento de agua no son elevadas, pues oscilan entre 20° [C] en la entrada de las membranas de osmosis. No obstante, las presiones de trabajo son elevadas si se habla en términos de seguridad, pues el agua entra a la primera etapa con cerca de 8 [bar] de presión, y a la segunda con 16 [bar], presiones no menores y que pueden afectar a la seguridad de los trabajadores.

En cuanto al tratamiento de aire, la situación es mucho menos compleja, pero no menos importante. Los equipos detallados en la Figura 5.4, poseen sensores e instrumentación propia integrada en los compresores que controla los parámetros de presión, humedad y temperatura, por lo que si algo sale de control, el equipo alarmará inmediatamente. Cabe mencionar que la presión media de trabajo es de 7 [bar], factor que debe ser considerado a la hora de estudiar la seguridad.

Finalmente está el tema de la polución. Los acopios de biomasa generan mucho polvo fino y material particulado fino, que con el viento se dispersan en la planta, generando mucha polución que afecta a los equipos que están en la intemperie. Si bien es cierto la POI y la sala de compresores son habitáculos cerrados, éstos no son para nada herméticos, y en muchas ocasiones se mantienen con las puertas abiertas, debido a descuido de los operadores y/o por motivos de ventilación. El último motivo ocurre principalmente en la sala de compresores por motivos de temperatura, si se cierran las puertas, aumenta la temperatura en la sala induciendo a la falla de los compresores por la variable mencionada. Lo anterior hace que ambas salas se llenen de polvo y material particulado fino que se

deposita en los equipos, generando condiciones que aumentan la probabilidad, y ocurrencia de fallas.

6.2 Historial de fallas

A partir de la conversación diaria tenida con operadores, supervisores, jefes de operaciones y mantenimiento, se pudo tener información relevante acerca del historial de falla de la Planta Desmineralizadora.

Los equipos que presentan fallas más recurrentes, son los sensores y transmisores. Los primeros se encargan principalmente de tomar mediciones de distintos parámetros de la planta, tales como flujos de entrada y/o salida, conductividad del agua, pH del agua, presiones y temperaturas, mientras que los segundos se encargan de procesar y enviar esta información a la sala de control, así el Operador de Sala de Control puede monitorear de manera remota la planta, y poder tomar acciones cuando sea necesario.

Una falla en un equipo antes mencionado, no trae consecuencias operacionales, pues el proceso no se detiene por no tener una medición en algún punto, sin embargo sí afecta a la toma de decisiones dado que se desconocen variables importantes para el sistema, lo que hace que se deban obtener esas mediciones por otros métodos como balances de masa, visualizaciones en terreno, o mediciones en el laboratorio. Lo anterior, dificulta las labores diarias de los trabajadores, aumentándoles la carga de trabajo, y en muchos casos, se puede incluso llegar a trabajar sin saber variables importantes.

Asimismo, frecuentemente se encuentran fugas de agua en diversas partes del proceso, ya sea en los tubos de las membranas, en las coplas de éstos, o en el sistema de piping de la planta. Lo anterior hace que se pierdan flujos muy mínimos, por lo que operacionalmente no hay grandes pérdidas. El gran problema de éstas fugas es que pueden mojar otros elementos, haciendo que éstos entren en falla. También, mojan el piso de la planta, haciendo más inseguro el tránsito al tener mayor riesgo de caída, afectando la seguridad de los trabajadores.

Otros equipos que han fallado recurrentemente, pero con menos frecuencia que los anteriores, son las válvulas automáticas. Éstas, direccionan los flujos y controlan los caudales de las diversas etapas del proceso. Estas válvulas son operadas mediante un PLC y la acción de relés. Las fallas más recurrentes de estos equipos, es que no se puedan accionar, quedando fijos en su última posición, ya sea ésta completamente abierta, o completamente cerrada, como es usual en su funcionamiento. Al no poder hacer esto, ciertas vías quedan incomunicadas, u otras quedas comunicadas permanentemente, haciendo por ejemplo, que parte del flujo vaya directamente al estanque de reboses que es donde va el rechazo, o que vaya al retrolavado, perdiendo eficiencia y pudiendo llegar a comprometer otros equipos como las membranas o las bombas. Esta falla, afecta operacionalmente al proceso, pero, dependiendo de la válvula que falle, puede o no parar por completo el mismo.

En último lugar, se encuentran las fallas de las bombas y las membranas. Las membranas han sido reemplazadas en dos oportunidades, y debido sólo a saturación por su vida útil. A su vez, la bomba de retrolavado, debió ser reparada debido a un desgaste en los rodamientos que sostienen el eje. También, la bomba de alta presión de la segunda etapa

debió ser cambiada debido a falló por pérdida de eficiencia, es decir era incapaz de entregar presión al agua. Las fallas de éstos han sido puntuales y no son recurrentes.

Cabe señalar que todas las fallas de los equipos mencionados con anterioridad, son graves, pues sus efectos interrumpen la producción. Una falla en las membranas, permite obtener menor cantidad de agua permeada, debido a que la saturación es tal, que el agua no puede permear la membrana, quedando mucho en el rechazo y a su vez aumentando la presión de manera significativa. La falla de la bomba de retrolavado no permite limpiar el filtro de carbón activado, haciendo que éste pierda efectividad a la hora de remover cloro y partículas grandes, afectando de manera directa a las membranas, saturándolas y deteriorándolas más rápido. Finalmente, una falla de la bomba de alta presión de la segunda etapa, no permite que el agua ingrese al segundo conjunto de membranas, haciendo que el agua no quede de la calidad deseada, dañando directamente a la caldera.

En cuanto a los compresores, las fallas que éstos presentan son frecuentes. Cada dos semanas aproximadamente, los equipos comienzan a vibrar de manera excesiva, vibración que es detectada al tacto y la audición del equipo. Lo anterior es provocado debido a la contaminación presente en la planta. El polvo se introduce en el interior del equipo, acumulándose a tal punto que desbalancea el ventilador y los descansos de los tornillos, provocándose así la vibración. Además, ocasionalmente fallan por temperatura, cuando se cierran las puertas de la sala de compresores, o cuando el aire acondicionado de la misma está apagado o mal configurado. Cabe mencionar que cuando ocurre la falla por contaminación, se llama al proveedor de los compresores para que limpie los equipos y pueda solucionar el problema.

Finalmente, se debe mencionar la falla puntual que sufrió el PLC de la planta de osmosis debido a contaminación, que obligó a una detención no programada de tres días. El PLC es un controlador que permite obtener y enviar información a los sistemas computacionales, con el cual se ejecutan tareas para mantener los parámetros de la planta en niveles previamente establecidos por el Operador de Sala de Control. Sin el PLC, no se pueden manipular válvulas, arranques o detención de bombas, medición de niveles de estanque o censar la presión y temperaturas de trabajo, o sea, en palabras sencillas es dejar la POI sin cerebro y operando a la deriva. El tiempo de detención se debió a que no se contaba con un PLC en bodega, debido a que nadie pensó que alguna vez fallaría, además del elevado costo que representa tener un PLC inmovilizado.

La siguiente tabla presenta un resumen de lo expuesto en esta sección:

Equipo	Falla	N° de fallas/frecuencia	Consecuencia
Sensores	Obsolescencia	Semestral	No permite tener toda la información de los parámetros reales de la planta
Transmisores	Rotura de turbina	Anual	No permite tener toda la información de los parámetros reales de la planta
Coplas americanas	Uniones del piping	Mensual	Pérdidas de agua por filtraciones, se pierde eficiencia y afecta a la seguridad por poner piso resbaloso
Válvulas Automáticas	Sello mecánico/ Relé	Anual	Falla operacional, la planta no puede trabajar de forma óptima dado que los flujos no pueden pasar de etapas y/o pasan cuando no deben
Bomba de alta presión	Pérdida de eficiencia	Una vez	No se puede enviar agua a las membranas, no pudiendo permear agua
Bomba de retrolavado	Falla de rodamientos	Una vez	No se puede hacer el retrolavado del filtro CAA, perdiendo eficiencia.
Membranas de RO	Saturación	Tres veces	Se pierde eficiencia en la membrana al tener más rechazo y menos permeado. Además, aumenta considerablemente la presión pudiendo llegar a romper los tubos que las contienen.
Compresores	Desbalanceo de rotores	Quincenal	Se generan grandes vibraciones en el equipo, reduciendo la vida útil del mismo.
PLC	Contaminación	Una vez	Pérdida total de comunicación con la planta. Falla operacional grave. Detención de urgencia.

Tabla 6.2: Resumen de antecedentes de fallas ocurridos en la planta desmineralizadora

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente la organización no posee información o registro formal acerca del historial de fallas o equipos, por ende la recolección de la información es parcial, y está sujeta a la experiencia y opinión de operadores y supervisores. Pese a la dificultad que aquello representa, se pueden calcular indicadores de mantenimiento, los cuales deberán ser revisados y corregidos conforme se implementen registros de fallas. Además no se cuenta con información precisa acerca del tiempo de disponibilidad de la planta, o tiempos de detención, entre otros. La siguiente tabla muestra indicadores de mantenimiento para los equipos que poseen fallas frecuentes, más no para aquellos que poseen fallas únicas. Lo anterior se debe a que realizar cálculos de MTBF o MTTR no sería confiable dada la poca información que se posee al respecto.

Equipo	MTBF [horas]	MTTR [horas]
Sensores	4.320	1.440
Transmisores	8.760	720
Coplas americanas	720	720
Válvulas automáticas	8.760	48
Membranas de RO	26.280	120
Compresores	360	48

Tabla 6.3: Indicadores de mantenimiento para equipos con fallas frecuentes.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Análisis FMEA

Con el levantamiento hecho, es posible analizar las distintas maneras en que los equipos pueden fallar, sus causas y consecuencias. Este estudio, sienta sus bases en lo presentado y estudiado en la ISO 31.010, además de la metodología RCM y se realiza a cada uno de los equipos presentados con anterioridad. Lo facilita el posterior análisis de criticidad, y da indicios de cómo anticiparse a las fallas, haciendo que éstas tengan consecuencias menos significativas.

También, esta herramienta ha sido complementada con un pequeño análisis de consecuencias en materia de seguridad y medioambiente en el caso de la falla del equipo, junto con explicitar el costo del mismo en caso de un reemplazo. A continuación se presenta un ejemplo de este análisis para la bomba de alta presión de la I etapa de la osmosis inversa:

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observaciones**
Bomba de alta I etapa	Transportar el fluido para el proceso de osmosis inversa Elevar la presión del agua para el proceso de osmosis inversa Q=28 [m3/h] P= 8 [bar]	Cavitación	Baja presión de entrada	Desgaste del impulsor, pérdida de eficiencia	Pérdida de rendimiento (falla funcional)	Costo equipo: U$7.000 La falla del equipo puede generar un riesgo para la seguridad de los trabajadores dados los flujos, preisones y materiales que podrian desprenderse del equipo, sin embargo, al trabajar con agua, la falla no representa un riesgo mayor para el medioambiente.
		Recirculación de flujo	Funcionamiento inferior a los limites entregados por el fabricante	Cavitación	Bajo caudal de entrada (falla funcional)	
		Empuje radial/axial	Falla de descansos axiales/radiales, Variaciones de flujo	Desgaste de rodamientos y eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de rodamientos	Desgaste, desbalanceo, falta de lubricación	Aumento de temperatura, sonido de roce, aumento de vibraciones	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Rotura de sello	Desgaste, Empujes excesivos, recirculación, cavitación, sobre presión.	Pérdida de eficiencia del equipo	La bomba no levanta la presión deseada (falla potencial)	
		Falla de eje	Fatiga, desgaste, altas vibraciones	Desbalanceo dinámico, rotura del eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de motor	Sobrecalentamiento del motor, motor desenergizado	Falla funcional del equipo	Bomba no gira o no parte (falla funcional)	
		Desgaste de rodetes	Cavitación, desgaste normal del material, fluido muy abrasivo	Pérdida de eficiencia del equipo, y posterior falla funcional	La bomba no levanta la presión deseada (falla funcional)	

Tabla 6.4: Análisis FMEA realizado para la bomba de alta presión de la I etapa de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar de la Tabla 6.4, para un mismo equipo puede haber distintos modos de falla, cada uno con causas, consecuencias y pérdidas de funcionalidad particulares. Así, esta herramienta permite saber por ejemplo, que la bomba puede verse afectada a los fallos en rodamientos, y que puede ser detectado con análisis de vibraciones. El paso siguiente y lo que debiera contemplar el plan de mantenimiento del equipo, es por consiguiente un análisis rutinario de vibraciones en los descansos, y tener stock de rodamientos de aquella bomba. Así es como el siguiente trabajo de titulo pretende abordar los planes de mantenimiento de los equipos más críticos.

Las observaciones presentes en la Tabla 6.4 permiten completar posterior análisis de criticidad presente en la sección 6.4, al abordar las consecuencias de las fallas en materia medioambiental y de seguridad industrial, además de cuantificar el costo del equipo, que es un factor no menor al realizar este tipo de análisis.

Si el lector quiere profundizar en los detalles de los análisis FMEA, en la sección de Anexos se encuentran todas las tablas de los equipos ya mencionados, con el detalle correspondiente.

6.4 Análisis de criticidad

Para analizar la criticidad de los equipos, se ha decidido hacerlo mediante matrices de riesgo que evalúan aspectos de seguridad, impacto medioambiental, tiempo fuera de servicio, y costo de reemplazo en caso de falla. Este análisis se realizó para cada uno de los equipos a estudiar, a través de la matriz adjunta a continuación, y con base en el análisis FMEA.

Equipo:			
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**0**

Tabla 6.5: Matriz de análisis de criticidad confeccionada para evaluar el impacto de las fallas bajo los aspectos descritos en la misma.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla, cada aspecto de evaluación (seguridad, medio ambiente, pérdida de producción y costo reparación) está graduado de 0 a 4, según el impacto que cada equipo tenga al momento de fallar en las distintas materias.

Los impactos en seguridad y medioambientales son algo cualitativos, por lo que es necesario llegar a consensos que permitan disminuir la subjetividad y poder llevar esos criterios a los resultados más objetivos posibles. Caso contrario ocurre con los criterios de pérdida de producción y costo de reparación o reemplazo, los cuales tienen tramos bien definidos y bastante objetivos.

Los puntajes de criticidad asignada para cada ítem, se suman. Es decir, que un equipo puede tener un máximo de 16 puntos en esta escala de criticidad, y un mínimo de

cero. Se define que la suma algebraica es la manera más óptima de considerar los criterios, ya que así, ningún criterio adquiere más peso que otro a la hora de evaluar, lo que va en directa relación con los lineamientos de la organización en cuanto a aspectos de seguridades laborales y medioambientales. Es así, como una falla que genere alto impacto en seguridad y poco efecto en la producción, tendrá la misma criticidad que aquel que pudiese generar poco impacto en seguridad pero una gran pérdida de producción.

La tabla, fue completada según la observación en terreno, la experiencia en fallas anteriores de los operadores, el análisis que el autor realizó para ver las fallas, y la revisión y ayuda de los supervisores de producción y mantenimiento para poder hacer más certero el análisis.

A modo de ejemplo, se expone la matriz de criticidad para la bomba de alta presión de la I etapa de la RO, de modo que el lector pueda hacer el seguimiento desde el análisis FMEA hasta la categorización de criticidad, y entienda cómo se realizó esta parte del trabajo de titulación.

Equipo:	**Bomba alta presión I etapa**		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**3**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**12**

Tabla 6.6: Análisis de criticidad de la bomba de alta presión de la I etapa de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Si el lector quiere profundizar en los detalles del análisis de criticidad, en la sección de Anexos se encuentran todas las tablas de los equipos ya mencionados, con el detalle correspondiente.

6.5 Jerarquización

Los resultados del análisis de criticidad permiten clasificar los equipos en críticos (criticidad A), semicríticos (criticidad B) y poco críticos (criticidad C) según el puntaje obtenido en la matriz de criticidad (Tabla 6.4).

La nota máxima en cada ítem de riesgo, es de 4 puntos. Así, se define que si algún equipo adquiere una nota igual o superior a 8, este es crítico, debido a que en dos ítems adquiere la nota máxima, o en su defecto, adquiere notas del tipo 2 y 3 para varios índices, haciendo que en general, la falla del equipo afecte en muchos aspectos.

Ahora bien, si un equipo adquiere un nivel de criticidad inferior a 8 e igual o superior a 4, este será semicrítico. La definición anterior obedece a que si en algún aspecto de evaluación un equipo adquiere la nota máxima, es porque el riesgo es muy elevado en un solo aspecto, o bien, los ítems de evaluación tienen notas de nivel medio.

Finalmente, si un equipo adquiere un nivel de criticidad inferior a 4, este será considerado poco crítico, dado que su falla no afecta enormemente a un ítem, o bien, en general las consecuencias son bajas para todos los aspectos. La siguiente tabla resume los rangos para los cuales se han definido los niveles de criticidad:

Nivel de criticidad	Rango en matriz de criticidad
Crítico (A)	8-12
Semicrítico (B)	7-4
Poco crítico (C)	0-3

Tabla 6.7: Definición de tipos de criticidad según el puntaje obtenido en la matriz de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

Así, el resultado obtenido y la clasificación de los equipos pueden apreciarse en la siguiente tabla la cual se obtiene al aplicar la Tabla 6.4 a todos los equipos que componen el proceso.

Equipo	Criticidad	Clasificación
Membranas RO	12	A
Bomba de alta presión I etapa	12	A
Bomba de alta presión II etapa	12	A
Compresor	12	A
Filtro CAA	11	A
PLC	10	A
Bomba de agua cruda	9	A
Acumulador aire	9	A
Válvula alimentación filtro CAA	7	B
Válvula de servicio filtro CAA	7	B
Válvula de llenado TK retrolavado	7	B
Válvula de alimentación bomba I etapa	7	B
Válvula de alimentación bomba II etapa	7	B
válvula Agua desmi	7	B
Piping	7	B
Tk permeato	7	B
Bomba de retrolavado	6	B
Secadores	6	B
Bombas dosificadoras	5	B
Válvula by-pass agua cruda	5	B
Válvula flushing OR I	5	B
Válvula flushing OR II	5	B
Filtro de cartucho	5	B
Válvulas manuales	4	B
Sensores y transmisores	3	C
Válvula alimentación retrolavado filtro CAA	3	C
Válvula de desagüe retrolavado filtro CAA	3	C
Válvula de desagüe lavado filtro CAA	3	C
Válvula de recirculación permeato OR II	3	C
Válvulas check	3	C
Switch de presión	1	C
Filtros de aire	1	C
Manómetros	0	C

Tabla 6.8: Jerarquización de los equipos según los niveles de criticidad analizados en el punto 6.3

Fuente: Elaboración propia

La distribución de equipos puede apreciarse de mejor manera en el siguiente gráfico de torta, el cual refleja de manera visual la cantidad de equipos presentes en el segmento A, B o C:

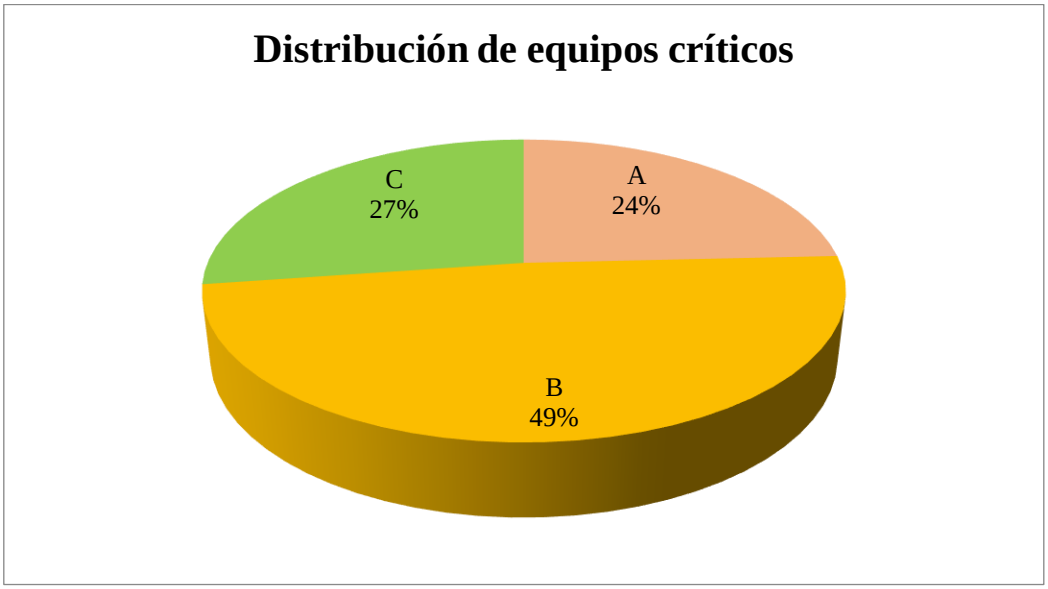


Figura 6.2: Gráfico de distribución de los equipos según los niveles de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar de la Figura 6.2, cerca de la mitad de los equipos a estudiar están en la clasificación de semicríticos, mientras que la otra mitad se divide en porciones muy similares entre equipos críticos y poco críticos.

El motivo principal por el que se quiere clasificar y jerarquizar equipos, es para dirigir los recursos hacia aquellos equipos que tengan mayor impacto en el proceso productivo y/o la seguridad o medioambiente en caso de falla. Así, las acciones y planificación a desarrollar en el presente trabajo de título, buscará obtener el mayor impacto posible para poder cumplir con los objetivos planteados al inicio.

En la sección de Anexos se podrán encontrar además los árboles de componentes de los equipos críticos, para así definir su taxonomía según lo expresado en la norma ISO 14.224.

7 Diseño de plan de mantenimiento

A partir de la jerarquización obtenida en la Sección 6 del presente trabajo, se desarrollan luego los planes de mantenimiento para los equipos críticos, utilizando la información presente en el Marco Teórico (Sección 4), los manuales que entregan los fabricantes, y las experiencias en otras plantas desmineralizadoras, no sin antes, realizar un proceso de mejora continua.

7.1 5S

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el trabajo de 5S es la base para la implementación de TPM como estrategia de gestión del mantenimiento. Este caso no es la excepción, es por ello que antes de siquiera hablar de mantenimiento, se hizo un trabajo inicial con 5S, que comprendió 3 de las 5 etapas de esta técnica de gestión. Dicho trabajo se inició en febrero de 2020, por lo que este modelo lleva más de un año de su implementación con resultados claros, y auditorias ya realizadas.

A continuación, se mostrarán las mejoras alcanzadas con la implementación de las 5S en la planta de osmosis inversa.

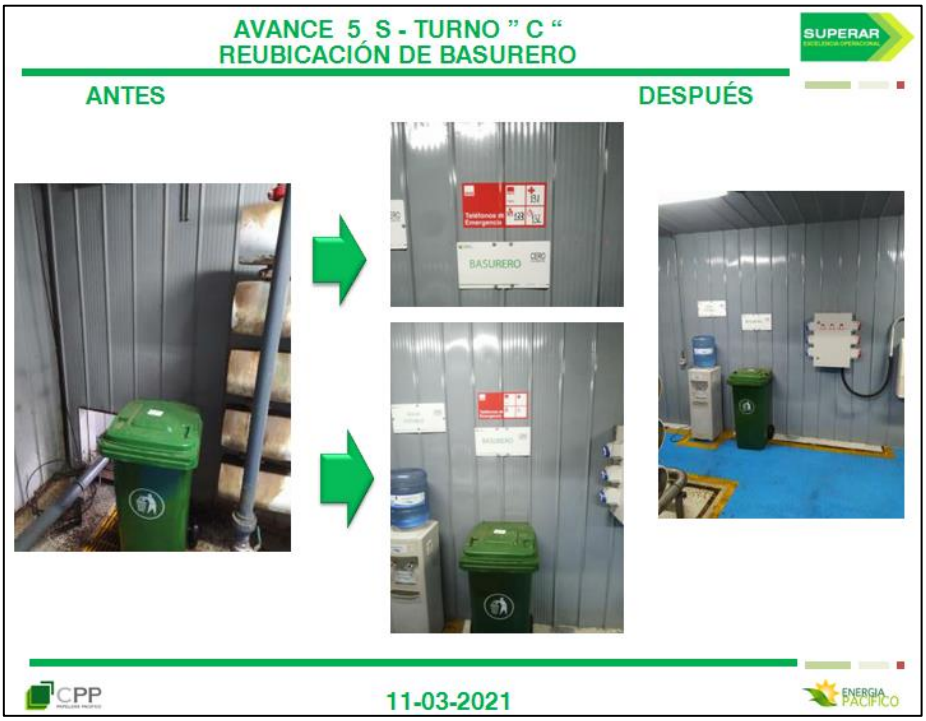


Figura 7.1: Mejora 5S de reubicación del basurero de la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2: Mejora 5S de cartel interior descriptivo del proceso de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.3: Mejora 5S de instalación de extintor de CO2 para panel eléctrico.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.4: Mejora 5S de rotulado de etiquetado de manómetros de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

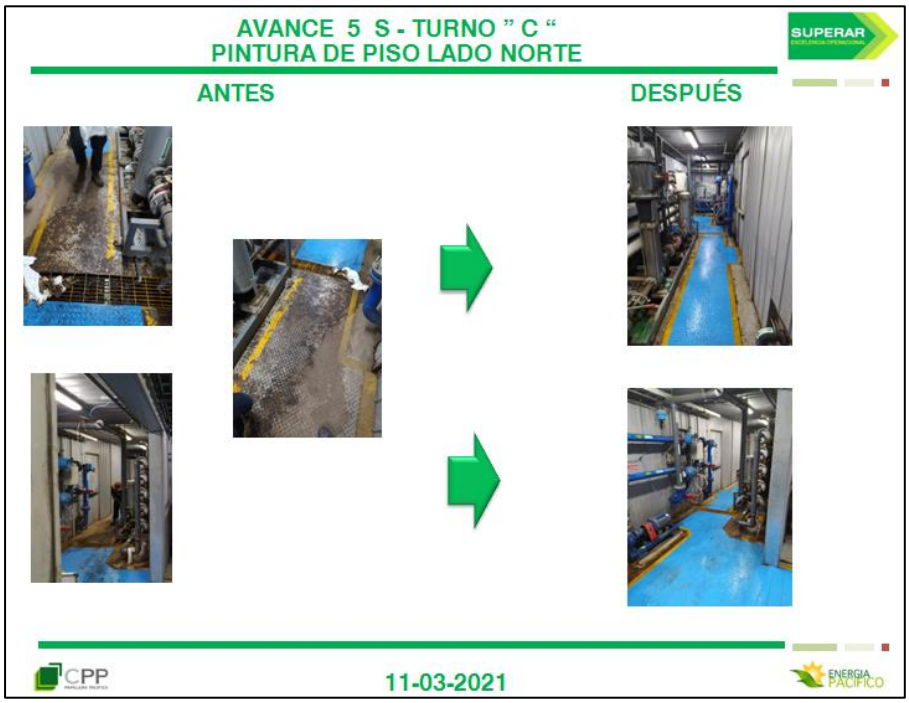


Figura 7.5: Mejora 5S de pintado de piso que facilita la detección de pozas por fugas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.6: Mejora 5S de demarcación de tableros eléctricos.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.7: Mejora 5S de pintado y etiquetado de tuberías.

Fuente: Elaboración propia.

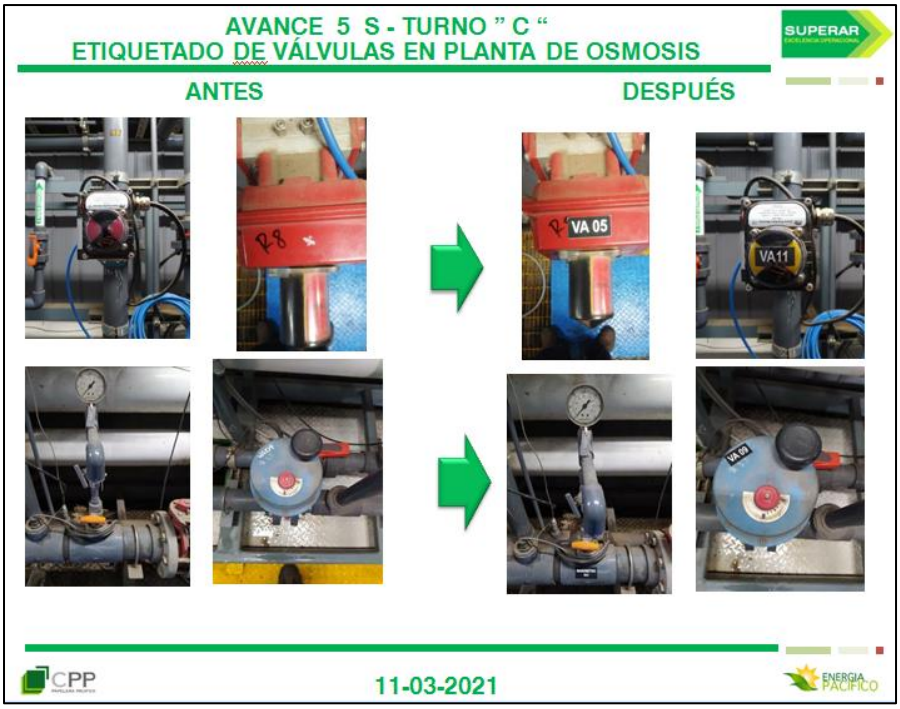


Figura 7.8: Mejora 5S de etiquetado de válvulas al interior de la planta de osmosis.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.9: Mejora 5S de carteles exteriores descriptivos de proceso y normas de seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.10: Mejora 5S de entrada lado norte a la planta de osmosis inversa, para disminuir el ingreso de polución.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.11: Mejora 5S de entrada lado sur a la planta de osmosis inversa, para disminuir el ingreso de polución.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.12: Mejora 5S de cambio de estación de químicos, a un galpón fuera de la planta por razones de seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.13: Resultado general de la implentación de la metodología 5S en la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.14: Estándar 5S de la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Con las mejoras expuestas en esta sección, se pudo lograr en la primera auditoría 5S realizada poco más de un año de implementada la metodología, un porcentaje de avance del 76,3%, lo que no sólo influyó en la estética de la planta, sino que también en la percepción de los trabajadores, quienes en una encuesta realizada por la gerencia, afirmaron haber mejorado su clima laboral debido en gran parte, a las mejoras que el programa 5S trae a sus vidas laborales. El detalle de la auditoría 5S, se encuentra presente en la sección de Anexos.

Además, se hicieron mejoras de tipo operacional, como la aislación de los accesos norte y sur, con un pasillo aislado con lamas, los cuales impiden de buena manera el ingreso de la polución generada por la biomasa, y cuyos efectos negativos ya han sido descritos con anterioridad. También se pudo adquirir un gabinete 5S, que permite almacenar materiales esenciales como la planta, como los filtros de cartucho, los cuales con gestión visual, se redujo la posibilidad de quedar sin stock de este vital elemento para el funcionamiento de la planta.

El cambio de la estación de químicos se realizó luego de que un trabajador se accidentara dosificando los compuestos. Dicha maniobra, se hacía de manera manual, y en el interior de la misma planta de osmosis, con un espacio muy reducido, lo que aumentaba el riesgo de sufrir un accidente. Luego de esto, se construyó una estación dedicada a los químicos de la planta, y se automatizó el proceso utilizando bombas dosificadoras.

7.2 Mantenimiento Autónomo

Una vez implementado 5S, que es la base del TPM, y por consiguiente de sus pilares, se pudo empezar a trabajar en el pilar de MA.

Como se explicó en el Marco Teórico, el principal objetivo del mantenimiento autónomo, es que los operadores se encarguen de las labores más básicas del mantenimiento, como son labores de limpieza, lubricación, inspección y levantamiento y detección de fallas.

7.2.1 Compresores

La implementación del mantenimiento autónomo, se inició en dos equipos, que son los compresores. Estos activos, presentaban alerta de falla cada 360 horas de funcionamiento (1 cada 2 semanas aproximadamente). Ante esto, el supervisor de mantenimiento mecánico debía llamar al proveedor de KAESER, para que revisara los compresores y arreglara la falla. En cada una de estas, la alerta era simplemente por desbalanceo del ventilador del compresor, el cual acumulaba polvo de biomasa, y esto hacía desbalancear el rotor.

Ante el anterior escenario, se evidenció una oportunidad de mejora y disminución de costo, ya que cada visita era cobrada (cercana a los US $1.000). Así, el autor de este trabajo junto a los mecánicos de la planta, aprendieron del proveedor del servicio de mantenimiento de KAESER, a limpiar de manera interna el equipo.

Una vez adquirido el conocimiento, este fue transmitido a los operadores, en distintas sesiones de capacitaciones, poniendo énfasis en la seguridad y las medidas precautorias a tener cuando se realizase esta maniobra. A continuación, se presentan las imágenes de las capacitaciones además de la documentación de las mismas.

Figura 7.15: Operador revisando el filtro de aire, identificando exceso de polvo en este.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.16: Operador limpiando el ventilador del compresor con aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.17: Operadores se familiarizan con el conjunto interno del equipo, su funcionamiento y componentes.

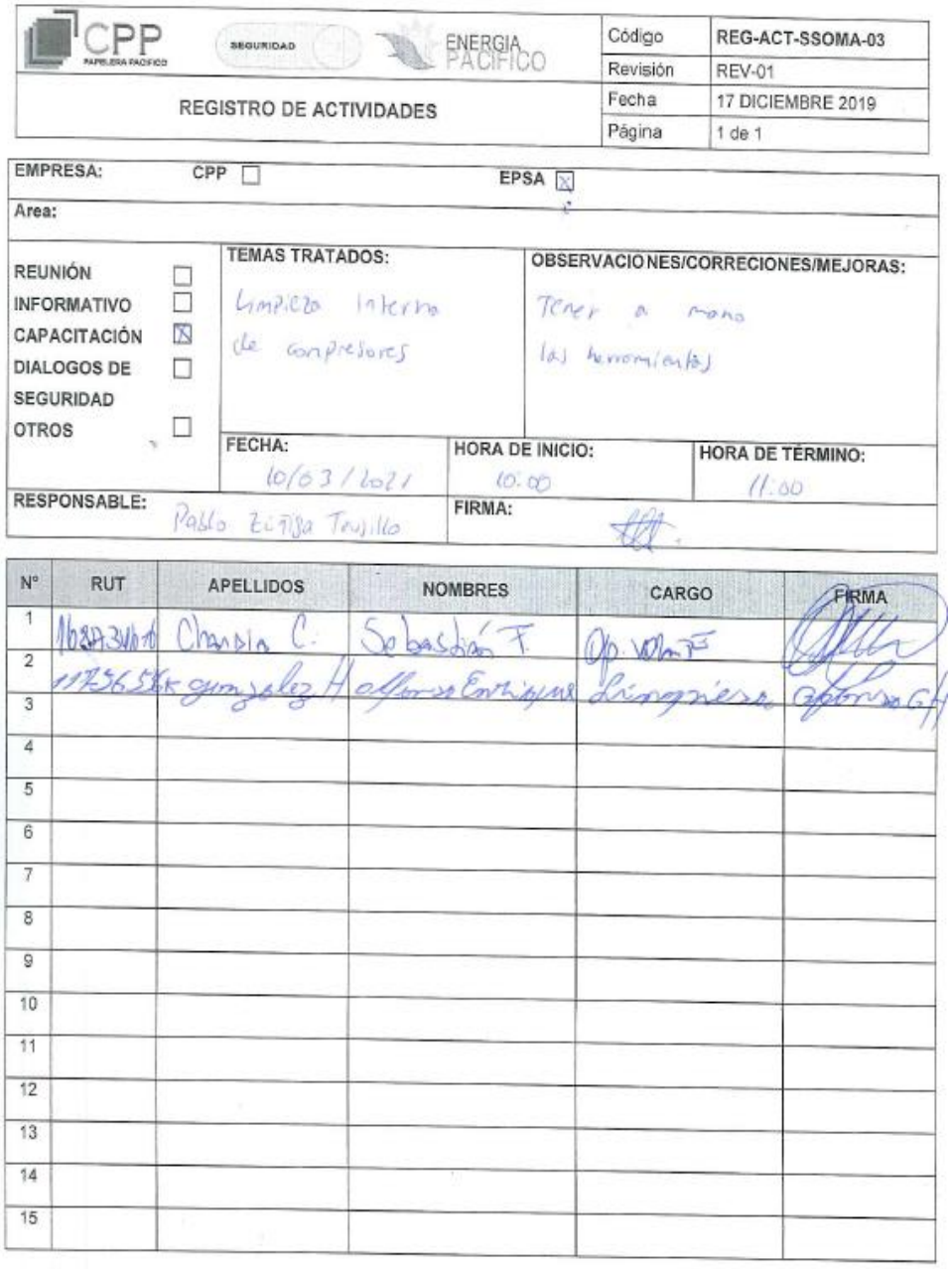
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.18: Trabajadores aprenden a limpiar el conjunto interno del compresor para evitar fallas por falta de limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.19: Operadores limpian tapas de compresores además del conjunto interno.

Fuente: Elaboración propia.



CPP PAPELERA PACÍFICO	SEGURIDAD	ENERGÍA PACÍFICO	Código	REG-ACT-SSOMA-03
REGISTRO DE ACTIVIDADES			Revisión	REV-01
			Fecha	17 DICIEMBRE 2019
			Página	1 de 1

EMPRESA: CPP ☐ EPSA ☒

Area:

	TEMAS TRATADOS:	OBSERVACIONES/CORRECIONES/MEJORAS:
REUNIÓN ☐	Limpieza interna de compresores	Tener a mano las herramientas
INFORMATIVO ☐		
CAPACITACIÓN ☒		
DIALOGOS DE SEGURIDAD ☐		
OTROS ☐		

FECHA:	HORA DE INICIO:	HORA DE TÉRMINO:
10/03/2021	10.00	11:00

RESPONSABLE: Pablo Zúñiga Trujillo FIRMA:

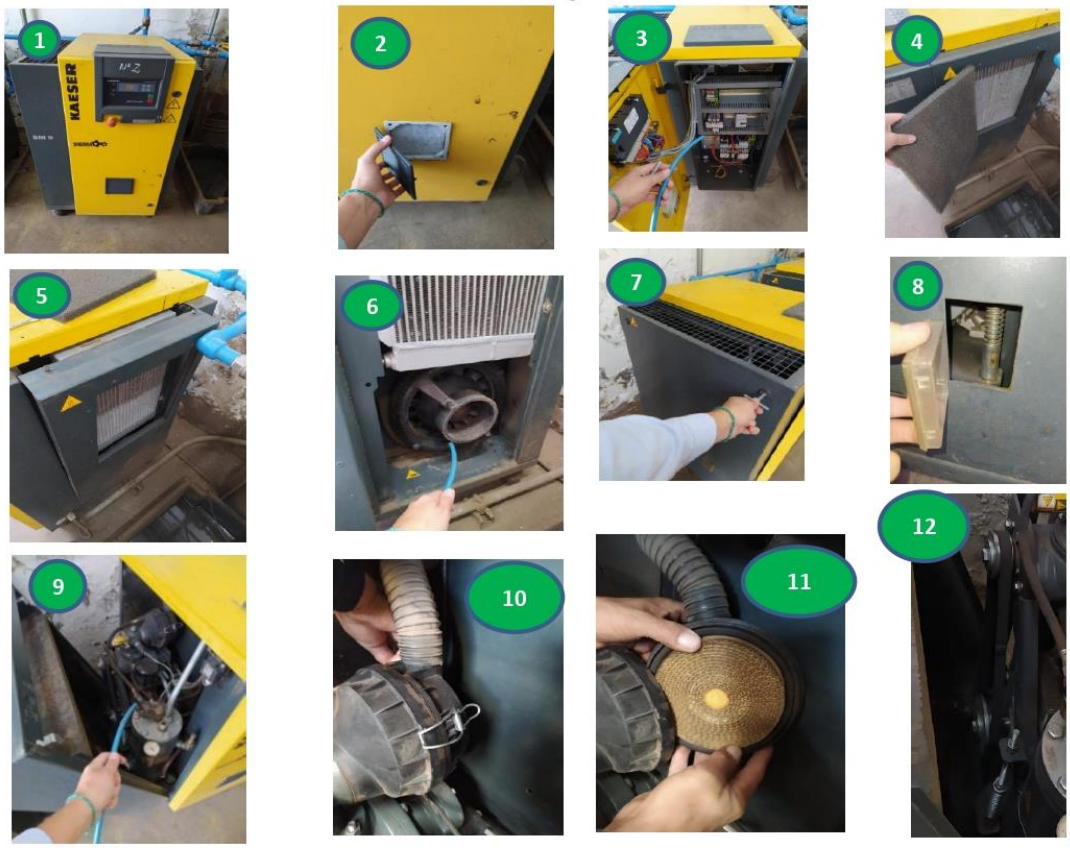
N°	RUT	APELLIDOS	NOMBRES	CARGO	FIRMA
1	[illegible]	Chandia C.	Sebastián F.	Op. [illegible]	
2	[illegible]	González H.	[illegible]	Ingeniero	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Figura 7.20: Fotocopia del documento de respaldo de capacitaciones interno de la organización.

Fuente: Elaboración propia.

Con cada una de las capacitaciones realizada, se recibieron las retroalimentaciones de los trabajadores, y los aportes que cada uno hizo concluyeron con un documento de estandarización del proceso de limpieza interno de los compresores, el cual es mostrado a continuación. La Figura 7.20 es un ejemplo del registro de hoja de capacitación. En la sección de anexos se podrá encontrar con las otras dos capacitaciones realizadas a otros turnos.

Plan de limpieza semanal Compresores



Ítem	Componente	Estándar de limpieza	Estandar de inspección	Inspección
1	Compresor	Sin polvo	Sin abolladura ni vibraciones	
2	Tapa frontal	Sin polvo	Esponja limpia	
3	PLC	Sin polvo	Sin cables dañados	
4	Esponja tapa oriente	Sin polvo	Sin trizaduras	
5	Tapa oriente	Sin polvo	Sin abolladuras	
6	Ventilador	Sin polvo	Limpio, sin abolladuras	
7	Tapa poniente	Sin polvo	Sin abolladuras	
8	Mirillas tensión y aceite	Sin polvo	Indicador de la mitad para abajo	
9	Conjunto interno	Sin polvo	Sin filtraciones y limpio	
10	Ducto succión	Sin polvo	Sin abolladuras y limpio	
11	Filtro de aire	Sin polvo	Limpio, sin polvo, sin trizaduras	
12	Correa	Sin polvo	Sin daños ni doblamiento	

Método de limpieza:

Herramientas: Llave de compresor / Llave Allen n° 4

Responsable: Operador volante / Auxiliar de caldera y biomasa

Figura 7.21: Protocolo de limpieza interna de compresores hecho para operadores.

Fuente: Elaboración propia.

El protocolo diseñado contiene imágenes explicitas de lo que los operadores deben hacer además de un orden establecido, esto con el fin de disminuir errores humanos que pueden desencadenar en una falla para el equipo. También, incluye una inspección que deben realizar al momento de hacer la limpieza, junto con el estándar que debe tener cada uno de los elementos a revisar, esto con el objetivo de poder levantar posibles fallas prematuras, como por ejemplo, desgaste en la correa, o falta de aceite en el conjunto.

Para complementar la limpieza de los compresores, la cual se definió de una periodicidad de una semana, se diseñó un plan de limpieza para la sala de compresores, la cual no posee un estándar óptimo, dado que está expuesta a la intemperie, generando que la vida útil de los equipos pueda verse afectada.

ENERGIA PACIFICO

Registro de limpieza e inspección

SUPERAR

Sector:	Sala de compresores																															
Actividad	Frecuencia		Mes: Marzo																													
	Diaria	Semanal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Limpieza de piso	x																															
Limpieza exterior de compresores	x																															
Limpieza exterior de secadores	x																															
Limpieza interior de compresor		x																														
Inspección de acumuladores		x																														

Inspección			
Actividad	Frecuencia	Tipo de inspección	Estándar
	Diaria		
Equipos sin daños superficiales	x	👁	Sin abolladuras o trizaduras
Equipos sin ruidos extraños	x	👂	No debe sonar más fuerte ni tener un sonido ronco
Equipo sin vibraciones excesivas	x	🖐 👂	No debe tener movimientos, ni grandes vibraciones al tacto
Equipo sin alta temperatura	x	🖐	No debe emitir calor, ni menos ser caliente al tacto
Fugas de aire en la línea	x	👂 👁 🖐	No debe haber fugas en ninguna línea
Agua en el piso	x	👁	El piso debe estar seco, el agua debe estar en los contenedores

Observaciones: **Encargado de área**

Tabla 7.1: Registro de limpieza e inspección de la sala de compresores.

Fuente: Elaboración propia.

Con la implementación de estas medidas, se eliminaron las fallas por falta de limpieza en los compresores, evidenciándose la siguiente alerta de falla alrededor de 2000 horas después de la última, sólo por conceptos de limpieza. Como se verá más adelante, las 2000 horas son parte del mantenimiento programado de la máquina, por lo que a priori, se podría decir que las fallas por limpieza se erradicaron, sin embargo, la cantidad de tiempo e información disponible aún es muy poca para poder declarar con autoridad lo anterior, no obstante, se evidencia una mejora clara en el MTBF. Lo anterior es un claro ejemplo de cómo el mantenimiento autónomo puede impactar en la vida útil de los equipos, y cómo con acciones tan sencillas como la limpieza, el mantenimiento autónomo es capaz de lograr su objetivo.

7.2.2 Planta de Osmosis Inversa

Para aplicar Mantenimiento autónomo en la planta de osmosis, se tuvo que ser riguroso con los pasos que plantea la metodología TPM en este aspecto, y que están descritos en el marco teórico de este trabajo, ya que no se habla un equipo en particular, sino que de un área con un sistema de equipos y un proceso más complejo. Lo anterior no implica que en los compresores no se hayan seguido los pasos, pues si se analiza la manera de abordar el problema y darle solución se podrá notar que la metodología está implícita.

Por temas de tiempo, se pudo llegar hasta el paso 3 de la metodología de MA, que es la elaboración de planes de limpieza, inspección y lubricación, pasando por la limpieza inicial y la eliminación de fuentes de contaminación y lugares de difícil acceso.

Etapa 1: Limpieza inicial

La limpieza inicial, es una limpieza profunda, desde la cual se descubren irregularidades en los equipos, en el entorno, y se fija el modelo a seguir para aspectos como la limpieza.

Figura 7.22: Limpieza inicial de canaletas de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.23: Limpieza inicial de la primera etapa de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.24: Limpieza inicial de la estación de retrolavado de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.25: Limpieza de la segunda etapa de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Con la limpieza inicial, se obtuvieron las tablas 5.1 a 5.6 de la sección de Antecedentes generales, donde se puede apreciar las distintas carencias que presentan los equipos, que van desde la falta de etiquetados de identificación, hasta equipos deficientes en su funcionamiento.

En conjunto con abordar temas de limpieza, se trabajó en la capacitación de los operadores con LUP's (Lección de Un Punto), donde en pasos sencillos, se indican tareas esenciales para el proceso de desmineralización de la planta. Para este caso, se hicieron LUP's para la operación de la planta en modo manual desde el tablero eléctrico, y el cambio de filtros de cartuchos.

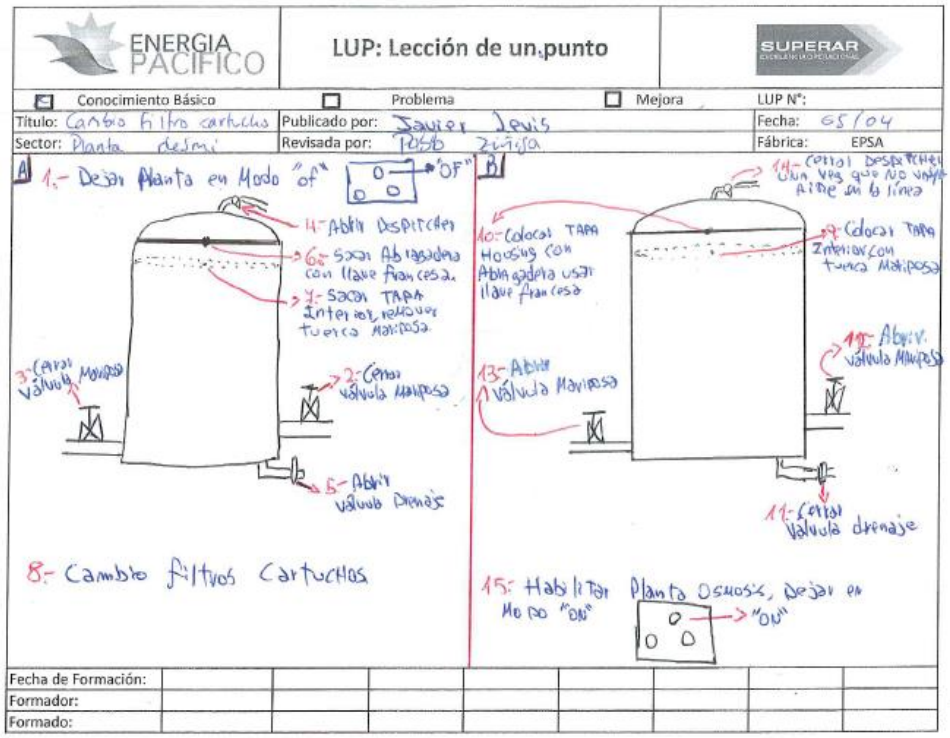


Figura 7.26: Lección de un punto acerca del cambio de filtro de cartuchos.

Fuente: Elaboración propia.

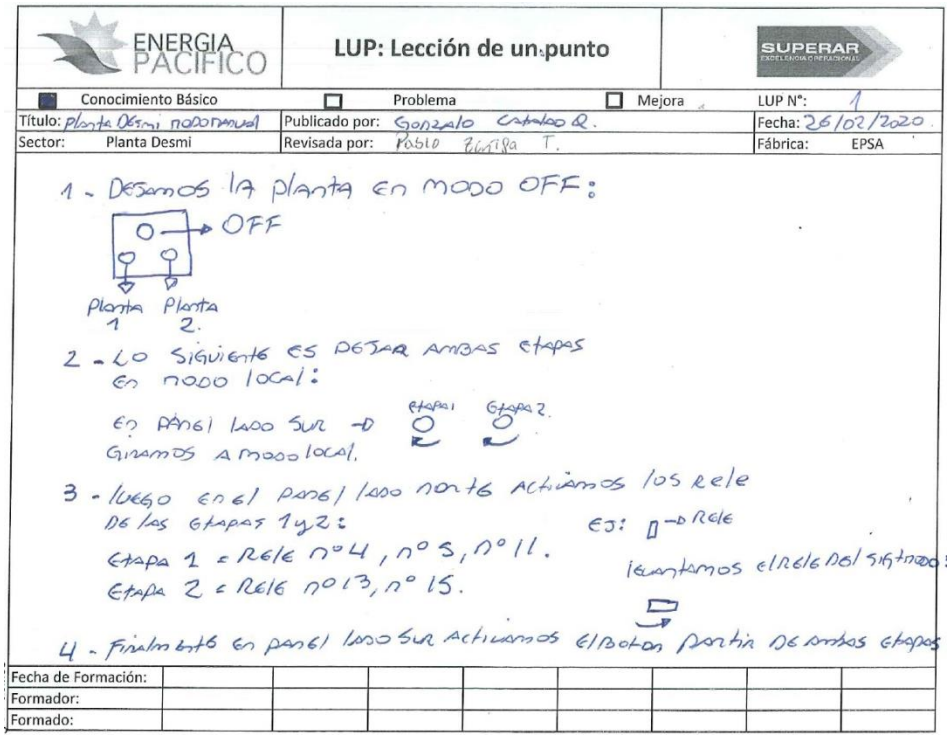


Figura 7.27: Lección de un punto acerca de la operación de la planta RO en modo manual.

Fuente: Elaboración propia.

Con las LUP se busca luego, estandarizar tareas esenciales dentro de las actividades de la planta, pero transmitiéndolas de manera rápida y sencilla, de modo que todos los operadores puedan entenderlas, y fortaleciendo la comunicación entre ellos al hacer que ellos mismos confeccionen las LUP's y transmitan y capaciten a sus compañeros.

Etapa 2: Eliminación de fuentes de contaminación y lugares de difícil acceso

Como se ha mencionado con anterioridad, la polución que genera la biomasa con el polvo fino, afecta a buena parte de la planta, y la planta de osmosis no es la excepción. Evidentemente esta es una fuente de contaminación para muchos de los equipos, haciendo que equipos rotatorios se desbalanceen por efecto de acumulación de polvillo, como se vio con el ejemplo previo de los compresores, y que la instrumentación pierda calibración o simplemente se descomponga.

Es así, como en conjunto con el programa 5S, se trabajó en un sistema que pudiese aislar aun más el espacio físico de la planta, en específico, las entradas norte y sur de la misma, que es por donde más ingresa el material particulado fino.

Figura 7.28: Entrada lado norte a la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

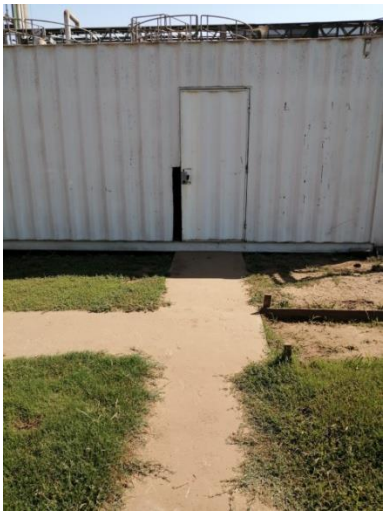


Figura 7.29: Entrada lado sur a la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, no existía ningún método de mitigación de polvo para la planta de osmosis, además, como se puede apreciar en la entrada sur (Figura 7.28), las puertas presentaban roturas y por consiguiente una paupérrima aislación. También, se debe considerar el factor humano, dado que los operadores olvidan cerrar la puerta y esta puede quedar abierta durante horas.

Por lo anterior, se ideó un sistema que ayudase a mitigar la entrada de polvo y material particulado. Este consiste en un cubículo metálico cerrado, justo antes de la entrada a la planta, con un acceso con lamas que ayuda a mitigar la entrada de polvo, como se ve a continuación:

Figura 7.30: Cubículo de entrada al lado norte de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.31: Vista interior de la entrada norte de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

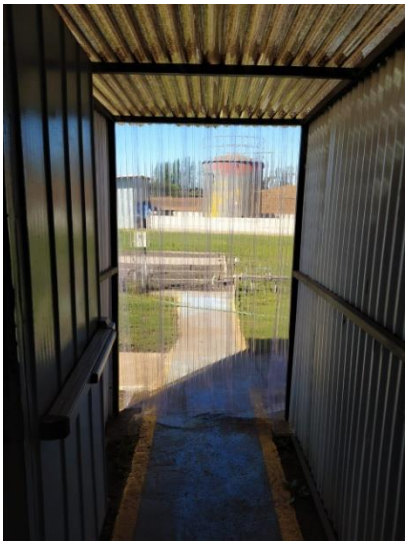


Figura 7.32: Vista interior de la entrada sur de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

Esta mejora llevada a cabo en conjunto con 5S, impactó de buena manera en la periodicidad que requiere la planta en cuanto aseo y en la contaminación que esta presentaba, pues de hacerse aseo todos los días, se pudo disminuir a sólo cuatro días, asignándole dicha tarea a un turno en específico.

Otra fuente importante de contaminación son las fugas de agua que presenta la planta en las conexiones americanas de los tubos de membranas, sensores, y otros elementos. Para resolver lo anterior, se realizaron las gestiones pertinentes para contactar a un contratista especializado en el área y que pudiese arreglar las fugas. A la fecha de entrega de este trabajo de título, dicha tarea no pudo ser completada a cabalidad, dado que muchas de esas fugas, se deben reparar en una detención total de planta.

Como comentario final, en esta etapa se puede evidenciar cómo el trabajo de 5S realizado previamente a la llegada del autor, y la continuación de éste por el mismo, facilitó de gran manera la implementación de MA del TPM, y el cómo las 5S resultan la base para los pilares del TPM.

Etapa 3: Elaboración de estándares de limpieza, inspección y lubricación

Realizadas las etapas 1 y 2, corresponde luego, elaborar los estándares de limpieza e inspección de la planta de osmosis.

La limpieza inicial realizada en la etapa 1, dio luces al autor de las tareas necesarias, para mantener estándares de limpieza acordes al contexto operacional. Además, el plan de limpieza fue complementado con ideas de los propios operadores, según las tareas que ellos consideraban necesarias hacer en este ámbito. A continuación se presenta el plan de limpieza de la planta de osmosis inversa.

Plan de limpieza
Planta de Osmosis Inversa

N°	Actividad	Método de limpieza			Estándar
1	Limpieza lado norte	Piso:	Equipos:	Instrumentación	Sin polvo
2	Limpieza bajo tubos I y II etapa	Piso:	Equipos:	Instrumentación	Sin polvo
3	Limpieza de retrolavado	Piso:	Equipos:	Instrumentación	Sin polvo
4	Limpieza sistema CIP	Piso:	Equipos:	Instrumentación	Sin polvo
5	Limpieza lado sur	Piso:	Equipos:	Instrumentación	Sin polvo
6	Limpieza de entradas norte y sur	Piso:			Sin polvo

Duración estimada: 30 minutos

INSPECCIÓN

Componente	Estándar	Inspección
Equipos sin daños superficiales	Sin abolladuras o trizaduras en los equipos o cañerías	
Equipos sin ruidos extraños	Los sonidos deben ser los conocidos, sin variaciones	
Equipos sin vibraciones excesivas	No deben tener movimientos, ni grandes vibraciones al tacto	
Equipos sin alta temperatura	No deben emitir calor, ni menos estar calientes al tacto	
Fugas de agua en la línea	No debe haber fugas en ninguna línea	
Agua en el piso	No debe haber pozas por fugas en el piso	

Figura 7.33: Plan de limpieza de la planta de osmosis inversa, presente en el cuadro de área de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

El plan antes presentado, se confeccionó de la manera más lúdica posible, de modo que todos los operadores puedan entenderlo, y por consiguiente llevarlo a cabo.

Como se puede apreciar, presenta dos tablas, la primera es una serie de actividades enumeradas del 1 al 6, que se relacionan con las imágenes, también enumeradas del 1 al 6.

Presenta los métodos e instrumentos de limpieza con los que deben realizarse las actividades, donde principalmente se utiliza la hidrolavadora y la escobilla. Además se presenta el estándar, que es básicamente la ausencia de polvo en los distintos equipos.

La segunda tabla presenta una ruta de inspección que debe realizar el personal cada vez que realice las labores de limpieza. Se presenta el estándar que debe presentar cada uno de los componentes de la planta, junto con el tipo de inspección que debe realizar, ya sea visual, auditivo o de tacto.

Además del plan de limpieza, se confeccionó una calendarización mensual de las actividades, asignándole las tareas del lugar al turno C, tanto el primer día del turno, como el último día del mismo. Se debe considerar que los turnos son de 4 días, con 4 días de descanso, alternando los días de trabajo entre 12 horas diurnas (08:00 a 20:00 horas) y 12 horas nocturnas (20:00 a 08:00 horas). Dicho cronograma es presentado a continuación:

Registro de limpieza

Sector:	Planta desmi																																
	Frecuencia		Mes: Abril																														
Actividad	Diario	1° y 4° día del turno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1
Barrido de piso	x																																
Lavado de piso		x																															
Limpieza de válvulas		x																															
Limpieza de bombas		x																															
Limpieza sensores y transm.		x																															
Limpieza de Tubos		x																															
Limpieza de exterior		x																															

Responsable de área: Turno C

No realizar
Realizar

Tabla 7.2: Registro de limpieza de la planta de osmosis inversa, junto con las actividades a realizar y sus frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, los avances de la metodología 5S, permiten ir de la mano con la implementación de TPM. El trabajo realizado en esta sección del trabajo de titulación viene a confirmar al autor cómo las 5S resultan ser la base de los pilares del TPM.

7.3 Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo, como ya se ha mencionado con anterioridad, está referido a las medidas tomadas antes de la falla, debido a la criticidad de los equipos en cuanto a producción, o bien porque su desperfecto afecta gravemente al HSEC. Dentro de esa categoría, se encuentran el mantenimiento preventivo, predictivo y otros, que buscan evitar fallas intempestivas, facilitando así la planificación de las operaciones.

En la siguiente sección, se presentarán planes de mantenimiento proactivo a los equipos críticos en los cuales es factible realizar este tipo de tareas, en pro de aumentar la disponibilidad y confiabilidad. La metodología utilizada para ello, es principalmente la presentada por la herramienta RCM en sus siete preguntas, y su árbol de decisiones. Se consideró lo estudiado en el análisis FMEA, junto con los árboles de componentes presentes para cada equipo crítico en la sección de Anexos. Para cada modo de falla, se dio respuesta a la pregunta 6 de RCM. Evidentemente, no todos los modos de falla tiene acciones proactivas que permitan evitarlas, para éstas, simplemente se trabajará a mantenimiento correctivo.

Es necesario mencionar, que los planes aquí presentes fueron elaborados en base a la experiencia de los supervisores de operaciones y mantenimiento, en cuanto a sus necesidades y capacidades. Además, se tomó en cuenta la recomendación del fabricante para las distintas medidas aquí presentadas, así como también la experiencia en otras plantas desmineralizadoras expresadas en las distintas fuentes bibliográficas.

7.3.1 Membranas de RO

Las membranas de osmosis inversa, suelen ser bastantes fiables y por consiguiente no suelen tener demasiadas fallas. En general, su vida útil posee un rango de tres a cinco años. Como se evidenció en el marco teórico, carecen de partes móviles, y su mayor problema es la saturación del elemento semipermeable por la acumulación de sedimentos. A continuación se presenta una propuesta de plan de mantenimiento para este equipo crítico:

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Membranas de osmosis inversa	
Marca	Hydranautics	
Modelo	PRO-8-300-SP	
TAG	-	
Observaciones		

N°	Frecuencia	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Diaria	Flushing de membranas	Preventivo	0,25
2	Diaria	Análisis de flujo permeado	Predictivo	0,1
3	Diaria	Análisis de SDI	Predictivo	3
4	Semanal	Realizar análisis de conductividad	Predictivo	3
5	Mensual / A la falla	Cambio de filtros de cartucho	Preventivo / Predictivo (según medición de SDI)	1
6	A la falla	Cambio de membranas	Predictivo (según flujo permeado y conductividad)	72

Tabla 7.3: Plan de mantenimiento proactivo de membranas de RO.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que diariamente se debe hacer un flushing a las membranas, esto es, aplicar un chorro directo de agua a alta presión a la superficie semipermeable de modo que barra con las partículas que pudiesen estar obstruidas en la membrana. Actualmente esto ya se hace. Además, se considera monitorear el flujo permeado, ya que si este disminuye y aumenta el rechazo, es indicación clara de que la membrana está saturada y necesita ser reemplazada. También, se puede monitorear la conductividad, si esta es muy alta en el permeato, eso indica que hay muchas sales disueltas en el fluido, por lo que es un indicador de un mal funcionamiento de las membranas. Se pone énfasis en el elemento protector de las membranas, que son los filtros de cartucho, los cuales alivianan la carga de las primeras y les otorgan mayor vida útil. Para ello, se recomienda hacer medición diaria de SDI, para comprobar la saturación de los filtros, y cuando esta alcance valores mayores a 5 [% / min] realizar el cambio. En caso que no se alcance dicho valor en un periodo de un mes, se recomienda de todas formas cambiar los filtros de manera preventiva.

7.3.2 Bombas de alta presión

Las bombas de alta presión de ambas etapas de la RO, son similares. Ambas son centrífugas verticales, de diez etapas. La diferencia radica en la presión de descarga, con aproximadamente 7 [bar] para la primera etapa, y casi 16 [bar] para la segunda. Debido a lo anterior se hacen planes distintos, para enfatizar que ambos son equipos críticos distintos,

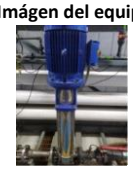
sin embargo, dada la naturaleza de su funcionamiento, las actividades y frecuencias son las mismas.

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Bomba de alta presión I etapa de la RO	
Marca	Grundfos	
Modelo	A96941989P10911	
TAG	GMB-02	
Observaciones		

N°	Frecuencia	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Semanal	Limpieza exterior del equipo	Autónomo	0,5
2	Semanal	Verificar nivel de lubricante	Autónomo	0,25
3	Semanal	Revisión de presión de descarga (pérdida de eficiencia)	Predictivo	0,25
4	Mensual	Rellenar nivel de aceite	Correctivo	0,5
5	Mensual	Análisis de vibraciones en bomba y motor	Predictivo	0,5
6	Según análisis de vibraciones	Cambio de rodamientos	Predictivo	8
7		Revisión de acoplamiento motor-bomba		0,5
8		Balanceo rotores		72
9	Mensual	Toma de temperatura en descansos de bomba y motor	Predictivo	0,5
10	Según medición de temperatura	Revisión de nivel de lubricación de descansos	Predictivo	0,25
11		Cambio de rodamientos de bomba		8
12	Trimestral	Reapriete de pernos	Preventivo	1,5
13	Semestral	Cambio aceite	Preventivo	1,5
14	Cada dos años	Cambio de sellos mecánicos	Preventivo	8
15	Cada dos años	Cambio de rodamientos	Preventivo	8
16	Cada dos años	Inspección de eje	Preventivo	1
17	cada dos años	Inspección de impulsores	Preventivo	3

Tabla 7.4: Plan de mantenimiento proactivo para bomba vertical multietapas de alta presión de la I etapa de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Bomba de alta presión II etapa de la RO	
Marca	KSB	
Modelo	Movitec VF 25/10 B	
TAG	GMB-03	
Observaciones		

N°	Frecuencia	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Semanal	Limpieza exterior del equipo	Autónomo	0,5
2	Semanal	Verificar nivel de lubricante	Autónomo	0,25
3	Semanal	Revisión de presión de descarga (pérdida de eficiencia)	Predictivo	0,25
4	Mensual	Rellenar nivel de aceite	Correctivo	0,5
5	Mensual	Análisis de vibraciones en bomba y motor	Predictivo	0,5
6	Según análisis de vibraciones	Cambio de rodamientos	Predictivo	8
7		Revisión de acoplamiento motor-bomba		0,5
8		Balanceo rotores		72
9	Mensual	Toma de temperatura en descansos de bomba y motor	Predictivo	0,5
10	Según medición de temperatura	Revisión de nivel de lubricación de descansos	Predictivo	0,25
11		Cambio de rodamientos de bomba		8
12	Trimestral	Reapriete de pernos	Preventivo	1,5
13	Semestral	Cambio aceite	Preventivo	1,5
14	Cada dos años	Cambio de sellos mecánicos	Preventivo	8
15	Cada dos años	Cambio de rodamientos	Preventivo	8
16	Cada dos años	Inspección de eje	Preventivo	1
17	cada dos años	Inspección de impulsores	Preventivo	3

Tabla 7.5: Plan de mantenimiento proactivo para la bomba vertical multietapas de alta presión de la II etapa de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, se considera lo ya expuesto en el MA en cuanto a limpieza se refiere, incluyéndose en esta sección la revisión de la lubricación. Además se debe verificar siempre la presión en la descarga, ya que si esta disminuye ocupando la misma cantidad de energía, es un indicador de pérdida de eficiencia del equipo, debido a distintos factores.

Estos equipos incluyen mantenimiento a condición mediante análisis de vibraciones, el cual es capaz de detectar problemas en rodamientos, acoplamientos, alineación y balanceo de rotores tanto en la bomba como en el motor. Para los primeros, además se incluye un cambio rutinario cada dos años, a modo de prevención, lo cual es corroborado con el fabricante. También se propone realizar medición de temperatura en los descansos, para descartar fallas en rodamientos.

El fabricante recomienda cambiar el aceite de lubricación cada tres meses, lo que se incluye en este plan, así como un cambio en los elementos sellantes, e inspección de eje e impulsores cada dos años. Debido a lo anterior, se decide realizar una inspección exhaustiva del equipo cada dos años que incluya tareas preventivas a modo de evitar fallas intempestivas.

7.3.3 Bombas de alimentación

Las bombas de alimentación de la RO, o bombas de agua cruda, son de la misma marca y modelo, y se encuentran en una configuración stand-by. Debido a lo anterior, se realiza un mismo plan para ambos activos.

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Bomba de agua cruda	
Marca	SIHI	
Modelo	ZLND 040200 AC BJ3 0B 2	
TAG	300-BOM-008 / 300-BOM-009	
Observaciones		

N°	Frecuencia	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Semanal	Limpieza exterior del equipo	Autónomo	0,5
2	Semanal	Verificar nivel de lubricante	Autónomo	0,25
3	Mensual	Rellenar nivel de aceite	Correctivo	0,5
4	Mensual	Análisis de vibraciones en bomba y motor	Predictivo	0,5
5	Según análisis de vibraciones	Cambio de rodamientos	Predictivo	3
6		Alineación de ejes		1
7		Revisión de acoplamiento motor-bomba		0,5
8		Balanceo rotores		24
9	Mensual	Toma de temperatura en descansos de bomba y motor	Predictivo	0,5
10	Según medición de temperatura	Revisión de nivel de lubricación de descansos	Predictivo	0,25
11		Cambio de rodamientos de bomba		3
12	Trimestral	Reapriete de pernos	Preventivo	1,5
13	Semestral	Cambio aceite	Preventivo	1,5
14	Cada dos años	Cambio de prensa estopa	Preventivo	2
15	Cada dos años	Cambio de rodamientos	Preventivo	3
16	Cada dos años	Inspección de eje	Preventivo	1
17	cada dos años	Inspección de impulsor	Preventivo	1

Tabla 7.6: Plan de mantenimiento proactivo para bomba centrífuga de alimentación de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Estas bombas son de tipo centrífugas de una etapa. Así las actividades a realizar, son similares a las bombas de alta presión, dado que los componentes y funcionamientos son muy parecidos. La diferencia radica principalmente, en los tiempos de mantenimiento, debido a que estos equipos son de menor tamaño, pudiéndose realizar las actividades en un menor lapsus de tiempo.

7.3.4 Compresores

Los compresores son iguales en marca y modelo, además poseen configuración paralela, es decir, que en muchas ocasiones, un compresor sólo no será capaz de suplir la cantidad de aire necesario para planta. Así, se requiere que ambos equipos estén disponibles para operar la mayor cantidad de tiempo posible. Debido a ello, el plan de mantenimiento propuesto tiene énfasis en la prevención de fallas, encontradas en el FMEA y en las recomendaciones del fabricante.

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Compresor	
Marca	Kaeser	
Modelo	SM9	
TAG	600-COM-001 / 600-COM-002	
Observaciones		

N°	Frecuencia [Horas]	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Semanal	Inspección interna de elementos	Autónomo	0,5
2	Semanal	Limpieza interna del equipo	Autónomo	1
3	2.000	Cambio de filtro de aceite	Preventivo	0,5
4	2.000	Cambio de filtro de aire	Preventivo	0,5
5	4.000	Cambio de aceite	Preventivo	0,5
6	6.000	Cambio de correa	Preventivo	1
7	12.000	Cambio de rodamientos motor	Preventivo	12
8	12.000	Cambio de rodamientos ventilador	Preventivo	12
9	12.000	Inspección de ejes y tornillos	Preventivo	3
10	12.000	Inspección de válvulas	Preventivo	3
11	36.000	Cambio de flexibles y tubins	Preventivo	48
12	36.000	Cambio de sellos	Preventivo	12

Tabla 7.7: Plan de mantenimiento proactivo para los compresores de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Además de lo propuesto en el plan de MA, se proponen distintas actividades cíclicas enfocadas en el cambio de repuestos que prevengan fallas, las cuales fueron divisadas en el análisis FMEA, como el cambio de correa, rodamientos de motor y ventilador, entre otros.

7.3.5 Filtro CAA

El filtro de carbón activado está considerado crítico por su influencia en el proceso productivo. Si éste falla, no se puede alimentar a las bombas, dejando a la planta sin agua, y por consiguiente, sin vapor para generar. El análisis FMEA no encontró modos de falla abordables de manera proactiva, así, las actividades para este equipo están enfocadas en la inspección de componentes, de elementos filtrantes, y otras acciones que extienden la vida útil. En caso de que los carbones se encuentren muy deteriorados, se recomienda su reemplazo, sin embargo, no se considera una acción cíclica para lo anterior, debido a que es costoso en términos monetarios y de tiempo.

Se debe destacar, que si este equipo tuviera cañerías de by pass, es decir que el flujo pueda ser capaz de saltarse este equipo, dejaría de ser crítico debido a que su falla no representaría una amenaza para la producción, dado que sí se puede operar sin filtro CAA durante un tiempo, sobre todo considerando que los niveles de cloro en el agua cruda son bajos.

ENERGIA PACIFICO	Plan de Mantenimiento de equipo crítico	Imágen del equipo
Equipo	Filtro CAA	
Marca	Aguasin	
Modelo	CAA-210	
TAG	Filtro CAA-210	
Observaciones		

N°	Frecuencia	Actividad	Tipo de Mantenimiento	Tiempo estimado [Horas]
1	Dos veces al día	Retrolavado con bomba	Preventivo	0,5
2	Semanal	Inspección de cañerias y flanges	Preventivo	0,5
3	Mensual	Revisión interna de carbones	Preventivo	1
4	A la falla	Reemplazo de elemento filtrante	Correctivo	48

Tabla 7.8: Plan de mantenimiento proactivo para el filtro de carbón activo.

Fuente: Elaboración propia.

7.3.6 Acumulador de aire comprimido

Los acumuladores de aire comprimido se consideraron críticos primeramente por razones de seguridad, dado que una falla de éstos, libera aire a una presión de 7 [bar], lo que puede ocasionar daños a los colaboradores. Así, también se generan pérdidas en el aire, exigiendo más a los compresores pudiendo llegar al punto en que éstos sean incapaces de administrar el flujo necesario, obligando así a una detención no programada.

Lamentablemente no se pudieron encontrar acciones que evitaran lo anterior, a excepción de inspecciones rutinarias de estos equipos, que incluya una inspección visual y auditiva para detectar a tiempo fugas, grietas, o daños superficiales que puedan generar fallas.

Lo anterior se incluye en la rutina de inspección de la sala de compresores (Tabla 7.1), y se establece una frecuencia semanal para la inspección de los acumuladores de aire.

7.3.7 PLC

El PLC es el cerebro de la planta, encargado de accionar la apertura o cierre de válvulas automáticas para controlar nos niveles de estanques, arrancar o detener bombas según los mismos indicadores, entre otros. Es claro que una falla de este componente resultaría en una falla catastrófica para la planta. Desafortunadamente, no existen muchas acciones que se puedan realizar y que agreguen real valor al mantenimiento para este componente.

Como se pudo apreciar en la Sección 6, la falla puntual de este componente se debió a una falta de limpieza que es constante en toda la planta. Debido a lo anterior, se decidió incluir limpieza de este componente dentro de la limpieza de los transmisores y sensores incluida en la Tabla 7.2

7.4 Plan matriz de mantenimiento

Con motivo de organizar las tareas programadas en el corto plazo (aquellas con frecuencia menor a un año), se propone una programación de las actividades de mantenimiento para los equipos críticos de la planta desmineralizadora, a iniciarse en enero del año 2022.

Con el fin de organizar bien las tareas mensuales, se estableció que la primera semana de cada mes, fuese dedicada al análisis de vibraciones en las bombas, que permite encontrar anomalías en rodamientos, acoplamientos, alineación y balanceo de los activos. Esta actividad toma alrededor de 30 minutos por equipo, por lo que fácilmente se puede lograr para los cuatro equipos de esta naturaleza en una misma semana.

La segunda semana de cada mes está dedicada a la toma de temperatura de los descansos en bombas y los motores de las mismas. Esta actividad permite detectar fallas en rodamientos. Al igual que la primera, esta tarea toma alrededor de 30 minutos por equipo, por lo que es realizable en el plazo de una semana.

La tercera semana está dedicada al reapriete de pernos en los equipos. Si bien esta actividad dura alrededor de una hora y media por equipo, si se distribuyen durante la semana, es realizable para las cuatro bombas que poseen esta actividad.

Finalmente se estableció que la última semana del mes esté dedicada al cambio de filtros de cartuchos de las membranas de osmosis inversa. Esta es una tarea corta, con duración aproximada de una hora. Se debe mencionar que esta actividad está sujeta a la medición de SDI, por lo que no siempre tendrá un frecuencia fija, no obstante, tenerla programada permite una mejor planificación.

Además de lo anterior, el plan matriz contiene las actividades semanales propias para cada equipo, las cuales no son superiores a una hora, por lo que no debieran ocupar mucho tiempo en su conjunto, y que son planificables y distribuibles para las actividades semanales.

Como se puede apreciar, esta distribución permite la acción de tareas de mantenimiento a otras partes de la planta donde predominan las tareas correctivas. La holgura y flexibilidad del plan matriz permite mejorar los niveles de confiabilidad y disponibilidad de la planta desmineralizadora, impactando lo menos posible a las tareas planificadas y no programadas para otras partes de la empresa.

A continuación se puede apreciar el plan matriz de mantenimiento a equipos críticos de la planta desmineralizadora:

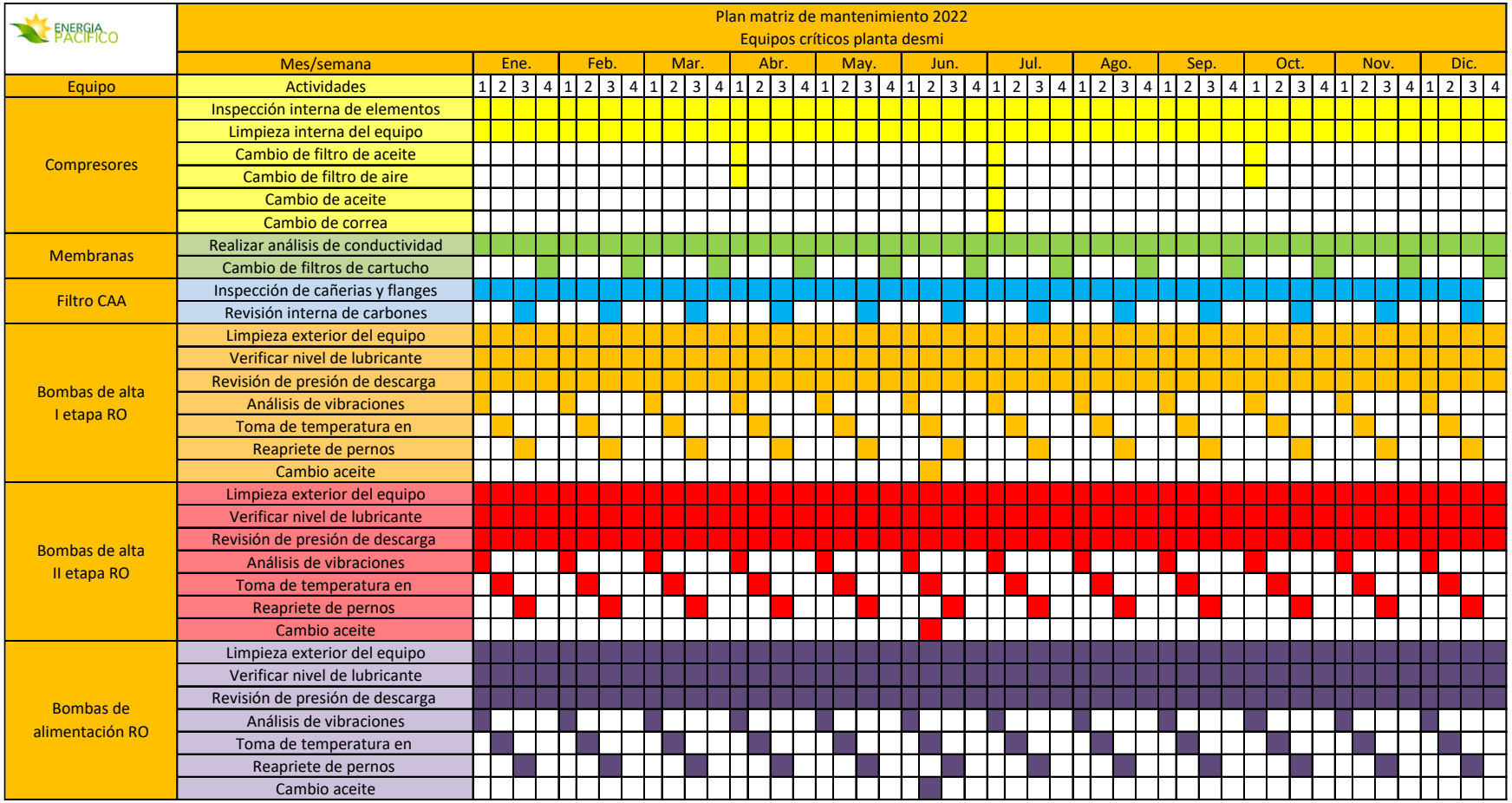


Tabla 7.9: Plan matriz de mantenimiento anual para la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

8 Análisis económico

Un análisis económico permite visualizar si el actual plan de mantenimiento es aplicable a la organización, y cuál sería el impacto del mismo en cuanto al gasto que representaría.

Al no tener información actualizada acerca de los gastos actuales en términos de mantenimiento en la planta desmineralizadora, se procederá a hacer una estimación de los costos del presente plan en el peor escenario, el cual implica hacer todas las actividades de mantenimiento proactivo en un mismo año, y comparar dichos costos con la pérdida de ingresos que generaría para la organización tener la central energética detenida debido a una falla intempestiva en la planta desmineralizadora. Se debe recordar que una falla grave en esta última, genera inmediatamente una falla en el central, dado que sin agua, no se puede operar la caldera que genera vapor, y por consiguiente la turbina.

Como se ha dicho con anterioridad, esta central de cogeneración, genera 15,6 [MWh] de energía eléctrica. De lo anterior, 1,5 [MWh] son utilizados para el autoconsumo de la planta, por lo que no pueden ser comercializados. No obstante, cerca de 6 [MWh] son vendidos y transferidos a la papelera cercana, a través de un contrato de cliente libre. Dicha potencia se vende a un precio cercano a los 60[US$/MWh]. El remanente de 8,1 [MWh] es vendido al mercado spot al costo marginal, el cual es regulado por el CEN.

El costo marginal depende de la disponibilidad de centrales para entregar energía al sistema eléctrico nacional (SEN), y de cómo el coordinador las llame a suministrar electricidad, entendiendo que éste debe satisfacer siempre la demanda nacional al menor precio posible, sin afectar la estabilidad del SEN. De ahí, se puede entender que el costo marginal sea tremendamente variable, entre el día y la noche (dada la indisponibilidad de la energía solar en las noches), o entre el invierno y verano (principalmente dada por la diferencia en la cota de agua en embalses de generación).

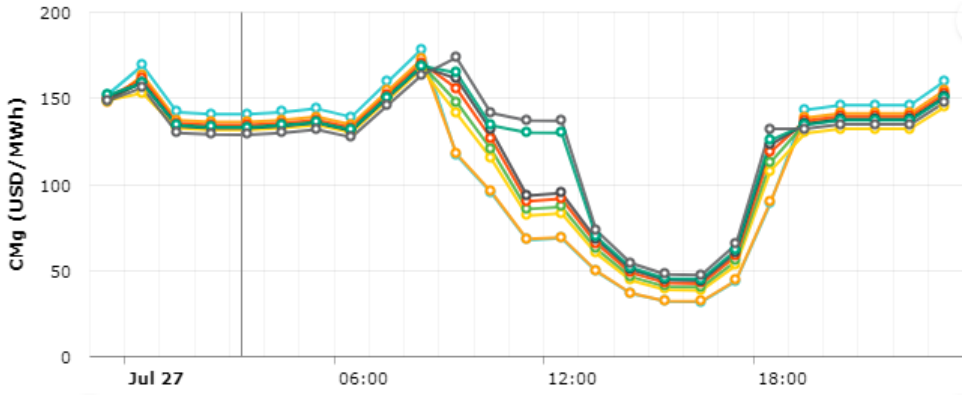


Figura 8.1: Costo marginal de la electricidad para las distintas barras de alimentación.

Fuente: Coordinador Eléctrico Nacional (https://www.coordinador.cl/). Consultado el 27 de julio de 2021 a las 23:30 horas.

La Figura 8.1 muestra una variación de la valorización del suministro eléctrico de entre 175 [USD/MWh] y 40 [USD/MWh] para un mismo día. Para efectos prácticos, se tomará simplemente el promedio de este día en particular, como referencia del ingreso por venta de energía al mercado spot. Así, se tienen los siguientes ingresos:

Cliente	Energía suministrada [MWh]	Precio de venta [USD/MWh]	Ingreso por hora [USD/h]
SEN	8,1	107,5	870,75
Papelera	6	60	360
Total			**1230,75**

Tabla 8.1: Ingresos por hora por venta de energía eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8.1 muestra el ingreso por hora debido a la venta de energía eléctrica. Evidentemente, no se puede suministrar todas las horas del año dado que durante el transcurso de éste, ocurren eventos adversos, o detenciones programadas. Si se considera una utilización del 90% del año para generación eléctrica, esto equivale a 7.884 horas, el ingreso anual por venta de electricidad asciende a:

$$\text{Ingreso anual electricidad} = 1.230{,}75\,[\frac{USD}{h}] \cdot 7.884[h] \tag{8}$$

$$\text{Ingreso anual electricidad} = 9.703.233\ [\text{USD}] \tag{9}$$

Además, la venta de electricidad no es el único producto de una central de cogeneración, dado que también se comercializa vapor de servicio, el cual es vendido a la papelera para su proceso manufacturero. La central de cogeneración suministra alrededor de 30 [ton/h] de vapor de servicio, a un precio aproximado de 40 [USD/ton] considerando la información de [17]. Haciendo la misma consideración anterior, de un funcionamiento del 90% de las horas del año, se obtiene el siguiente ingreso:

$$\text{Ingreso anual vapor} = 30\left[\frac{ton}{h}\right] \cdot 7.884[h] \cdot 40[\frac{USD}{ton}] \tag{10}$$

$$\text{Ingreso anual vapor} = 9.460.800\ [\text{USD}] \tag{11}$$

Así, se tiene un ingreso anual total equivalente a la suma del ingreso anual por venta de vapor y electricidad, equivalente a:

$$\text{Ingreso anual total} = 19.164.033\ [\text{USD}] \tag{12}$$

Sin embargo, para efectos de este estudio económico, es útil calcular la ganancia por hora que obtiene la organización. Considerando que para llegar a la cifra de (12), se trabajaron 7.884 horas efectivas, se tiene que:

$$\text{Ingreso total por hora} = \frac{19.164.033\ [USD]}{7.884\ [horas]} \tag{13}$$

$$\text{Ingreso total por hora} = 2430{,}75\ [\text{USD/h}] \tag{14}$$

Con la cifra antes obtenida es posible entonces obtener la pérdida de ganancia por falta de operatividad, esto es, por no poder producir debido a una falla grave en la planta desmineralizadora.

Se procede luego a estimar los costos del presente plan en términos de repuestos, instrumentos y RR.HH para ser llevado a cabo, en el peor escenario posible, es decir, aquel caso en el que en un mismo año se requieren hacer todas las actividades de los planes presentes en la Sección 7.3. Así, se tiene que para los repuestos e insumos de cada equipo existen los siguientes costos:

Equipo:	Compresores		
Repuesto	**Precio unitario (CLP)**	**Cantidad**	**Total**
Kit de filtros (aire, aceite y separador)	$ 240.000	3	$ 720.000
Bidón 5lt aceite	$ 40.000	1	$ 40.000
Correa	$ 10.000	1	$ 10.000
Rodamientos	$ 10.000	4	$ 40.000
Flexibles y tubins	$ 50.000	1	$ 50.000
Total			**$ 860.000**

Tabla 8.2: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de los compresores.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Membranas		
Repuesto	**Precio unitario (CLP)**	**Cantidad**	**Total**
Filtros de cartucho	$ 45.000	12	$ 540.000
Membrana semipermeable	$ 750.000	8	$ 6.000.000
Total			**$ 6.540.000**

Tabla 8.3: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de las membranas de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bomba alta presión I etapa RO		
Repuesto	**Precio unitario (CLP)**	**Cantidad**	**Total**
Aceite lubricante	$ 25.000	1	$ 25.000
Sellos mecánicos	$ 150.000	1	$ 150.000
Rodamientos	$ 25.000	2	$ 50.000
Total			**$ 225.000**

Tabla 8.4: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de la bomba de alta presión de la primera etapa de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bomba alta presión II etapa RO		
Repuesto	**Precio unitario (CLP)**	**Cantidad**	**Total**
Aceite lubricante	$ 25.000	1	$ 25.000
Sellos mecánicos	$ 150.000	1	$ 150.000
Rodamientos	$ 25.000	2	$ 50.000
Total			**$ 225.000**

Tabla 8.5: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de la bomba de alta presión de la segunda etapa de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bomba alimentación RO		
Repuesto	**Precio unitario (CLP)**	**Cantidad**	**Total**
Aceite lubricante (bidón 5 lt)	$ 25.000	2	$ 50.000
Prensa estopa	$ 5.000	2	$ 10.000
Rodamientos	$ 15.000	4	$ 60.000
Total			**$ 120.000**

Tabla 8.6: Costos de insumos para el plan de mantenimiento de las bombas de alimentación de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas anteriores representan los insumos que requiere cada equipo crítico para aplicar sus planes de mantenimiento completamente. Sin embargo, el plan también exige instrumentos de precisión para hacer mediciones, los cuales son utilizados en su mayoría para el mantenimiento predictivo, como el análisis de vibraciones, medición de temperatura, entre otros. El detalle de los anteriores, se encuentra en la siguiente tabla:

Instrumentos	Precio unitario (CLP)	Cantidad	Total
Medidor de vibraciones	$ 5.000.000	1	$ 5.000.000
Pirómetro (medidor de t°)	$ 50.000	1	$ 50.000
Kit SDI	$ 500.000	1	$ 500.000
Kit conductividad	$ 200.000	1	$ 200.000
Total			**$ 5.750.000**

Tabla 8.7: Costos de inversión en instrumentos para las mediciones del mantenimiento predictivo.

Fuente: Elaboración propia.

A lo anterior se le debe sumar los costos por personal, costos fijos que se pagan mes a mes a los técnicos y supervisores que se encargan de ejecutar y gestionar el plan de mantenimiento diseñado. Para ello, se requiere de tres mecánicos que puedan distribuirse de modo tal que siempre haya personal en planta, incluso en las noches, para llevar a cabo tareas de mantenimiento planificado así como mantenimiento correctivo. Finalmente se requiere un supervisor que planifique tareas, gestione repuestos, y supervise las actividades y lleve a cabo el control de éstas.

RRHH	Remuneración unitaria (CLP)	Cantidad	Total
Supervisor de mantenimiento	$ 1.500.000	1	$ 1.500.000
Mecánico de turno	$ 600.000	3	$ 1.800.000
Total			**$ 3.300.000**

Tabla 8.8: Costos fijos de personal requerido por el presente plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Así, si se suman los costos asociados al plan propuesto, se puede obtener el costo anual de mantenimiento en el peor caso, como ya se ha mencionado:

Costo de inversión (CLP)	$ 5.750.000
Costo fijo anual (CLP)	$ 39.600.000
Costo variable anual (peor escenario) (CLP)	$ 7.970.000
Costo anual de mantenimiento (CLP)	**$ 53.320.000**

Tabla 8.9: Costos totales de mantenimiento presupuestados en el presente plan.

Fuente: Elaboración propia.

Si se tiene un costo anual de mantenimiento de $53.320.000 CLP (69.427,10 USD considerando el Dólar estadounidense a $768 CLP), este representaría aproximadamente un 0,36% del ingreso anual. Además, se debe considerar que si se generase una falla intempestiva de un equipo crítico de la planta desmineralizadora, esta tendría al menos una duración de 24 horas, considerando que se requieren 12 horas para apagar y enfriar la

caldera, 7 horas para estar nuevamente operativa, y 5 para realizar la reparación según lo visto en el análisis de criticidad, eso, si se tienen los repuestos en bodega, de modo contrario, el tiempo de reparación se prolongaría mucho más. Se debe hacer énfasis en que sin agua, no se puede operar la caldera, de ahí nace entonces la necesidad de apagar el equipo cuando la planta desmineralizadora falle.

Considerando lo anterior, se puede obtener la pérdida de ganancia a partir de lo calculado en (14), obteniéndose:

$$\text{Pérdida de ganancia} = 2430{,}75 \left[\frac{\text{USD}}{\text{h}}\right] \cdot 24\ [\text{h}] \tag{15}$$

$$\text{Pérdida de ganancia} = 58.338\ [\text{USD}] \tag{16}$$

La pérdida de ganancia por una detención intempestiva optimista de 24 horas en la planta desmineralizadora, asciende a 58.338 [USD], cercano a $44.803.584 CLP considerando el dólar a $768 CLP, o sea, cerca de un 84% del costo total de mantenimiento anual.

Lo anterior no implica que no puedan ocurrir eventos similares o de más duración dentro de un mismo periodo. Además, se consideró el peor escenario dentro de los costos de mantenimiento, lo que con una buena planificación, no debiera ocurrir. Otro factor importante, es la inversión en instrumentos, con los cuales la organización ya trabaja desde su puesta en marcha, por lo que no es algo en lo que realmente se tenga que invertir. Si se considera también que los cambios de membrana se realizan cada tres a cinco años según lo expuesto en el historial de fallas (Tabla 6.1), la Tabla 8.9 queda como sigue:

Costo de inversión (CLP)	$ -
Costo fijo anual (CLP)	$ 39.600.000
Costo variable anual (peor escenario) (CLP)	$ 1.970.000
Costo anual de mantenimiento (CLP)	**$ 41.570.000**

Tabla 8.10: Costo anual real de mantenimiento que presenta el plan diseñado.

Fuente: Elaboración propia.

Descontado entonces el costo de inversión, y la adquisición de membranas dado que su recambio es a largo plazo, el costo anual de mantenimiento disminuye luego a $41.570.000 CLP o 54.362 USD, pudiendo concluir así que la implementación del presente plan de mantenimiento trae beneficios no sólo operacionales, sino que también económicos para la organización.

9 Conclusiones

Para finalizar el presente trabajo de titulación, se comentará acerca de las conclusiones que se obtienen a través del presente, haciendo una conexión fuerte con los objetivos propuestos en el inicio.

9.1 Conclusiones principales

Esta memoria de titulación cumplió con su principal objetivo, el cual fue diseñar un plan de mantenimiento para equipos críticos de una planta desmineralizadora de tecnología de osmosis inversa de una central de cogeneración. Lo anterior fue producto de un trabajo basado en las metodologías que hoy en día rigen el mundo del mantenimiento y la industria en general, como son el TPM y RCM; así como también en normas que entregan herramientas para trabajar criticidad y riesgo, como lo es la ISO 31.000.

Lo anterior le otorga contundencia al trabajo, al estar desarrollado de acuerdo a las indicaciones y recomendaciones que entregan tanto organizaciones internacionales como herramientas de gestión del mantenimiento más que probadas.

Se debe destacar el procedimiento seguido para lograr el objetivo principal, el cual resulta de un exhaustivo desarrollo y análisis de diversos factores, como el contexto operacional, la criticidad de cada componente de la planta desmineralizadora mediante herramientas que entrega la ISO 31.010, la implementación de un pilar del TPM y de 5S, entre otros.

Es necesario mencionar que el presente trabajo presenta la aprobación y aporte de distintos colaboradores de la organización en cuestión, tanto como operadores de planta como supervisores, haciendo que responda fielmente a las necesidades de la empresa, y sea un plan de mantenimiento que se ajusta al contexto operacional para el cual está pensado aplicarse.

A continuación se hará un desarrollo de las conclusiones respecto a los objetivos específicos que el presente trabajo tiene, dando respuesta a cada uno de los desafíos que el autor se propuso para llevar a cabo el trabajo.

9.2 Conclusiones específicas

- Se logra realizar un levantamiento de información de la organización en términos operativos y estratégicos. A través de este levantamiento se estudia el proceso productivo de la empresa, sus principales KPI’s y el proceso productivo de la planta desmineralizadora, así como sus indicadores de calidad. Con lo anterior se obtiene un panorama general del contexto operacional, donde luego se aborda el tema del historial de fallas de la organización, encontrándose con la gran dificultad de falta de información de las mismas. Pese a ello, se obtiene un registro estimado de las fallas en la planta desmineralizadora mediante entrevistas con operadores y

supervisores, finalizando con un levantamiento de equipos de la planta desmineralizadora a través de un listado de equipos, que es donde se estudia el diseño de un plan de mantenimiento.

- Mediante la investigación realizada, se logra encontrar herramientas de la acerca de la evaluación de criticidad, como las normas ISO 31.000 e ISO 31.010 así como también del RCM. A partir de ello, se aplican análisis FMEA al listado de equipos antes obtenido, que en conjunto con matrices de criticidad, se concluye en una jerarquización de elementos en críticos, semicríticos y poco críticos, para los cuales es posible enfocar los recursos de manera más eficiente.

- A partir de lo estudiado en el marco teórico acerca de las metodologías y herramientas de gestión del mantenimiento, se concluye que las labores más sencillas de mantenimiento deben ser realizadas por los operadores a partir del pilar de mantenimiento autónomo que entrega TPM, el cual requiere trabajar en la metodología de mejora continua 5S. Para las labores de mantenimiento planificado y proactivo, se concluye que la metodología RCM es la que más se ajusta a las necesidades de la organización, a través de sus siete preguntas y su árbol de decisiones.

- Con los pasos anteriores, se pudo luego confeccionar los planes de mantenimiento que el presente trabajo requería, a partir del levantamiento de la información, el análisis de criticidad, información de los proveedores de activos y experiencia de la organización. Lo anterior va acompañado de la implementación del método 5S de mejora continua, junto al pilar de mantenimiento autónomo de TPM, lo que facilita la gestión y ejecución de las labores planificadas. Finalmente, se diseña una planificación anual de actividades de mantenimiento planificado a través de un plan matriz.

- Para finalizar, se hace un análisis económico del plan de mantenimiento proactivo en términos de costos y RRHH, el cual compara la pérdida de ganancia por una falla intempestiva en la planta desmineralizadora de la central por falta de mantenimiento, con los costos asociados al presente plan en el peor de sus escenarios, el cual es realizar todas las actividades presentes en los planes de mantenimiento, en un mismo periodo. Se logra concluir finalmente que la implementación del presente trabajo de título trae ventajas no tan sólo operacionales, sino también económicas. No obstante, dada la falta de información acerca de los tiempos de disponibilidad, utilización y rendimiento, resulta imposible calcular el OEE.

9.3 Recomendaciones

A continuación se hacen una serie de recomendaciones a la organización que se desprenden del presente trabajo de título, y que no fueron abordados debido a que se encontraban fuera de los objetivos del mismo, o bien porque son oportunidades que abren nuevas líneas investigativas y de aplicación para una nueva memoria de titulación.

- Al momento de hacer el levantamiento de información acerca de los historiales de falla, se encuentra con la falta de información de la misma, como por ejemplo la carencia de documentación acerca del historial de equipos y fallas. Lo anterior va en directo perjuicio de los cálculos de los indicadores de mantenimiento, los cuales son estimados y no certeros. A partir de ello, se recomienda documentar las fallas y llevar un registro de la hoja de vida de los activos, y llevar registro acerca de los tiempos de detención y otros, de modo que pueda calcularse de manera más eficaz los indicadores de mantenimiento y el OEE, así como también ir más allá y abordar nuevas áreas como la confiabilidad.

- Se recomienda estudiar la posibilidad de la implementación de un ERP y de las ventajas que aquello conllevaría en términos operacionales y económicos. Un sistema informático de ese estilo, facilitaría la generación de OT's para los trabajos de mantenimiento y operaciones, podría llevar fácilmente el registro de fallas al que se hace mención anteriormente, como así también la lista de tareas pendientes tanto para operaciones como para mantenimiento. Además se podría hacer una gestión de repuestos mucho más amigable al tener comunicación con clientes internos mediante un mismo software informático.

- Finalmente, se recomienda actualizar el presente plan en cuanto a los indicadores de mantenimiento, actividades a realizar, frecuencia de tareas, y otros, en caso de ser implementado. Se debe ajustar el trabajo al contexto operacional real y económico de la organización, por lo que fácilmente puede sufrir modificaciones que vayan en pos de una mejor gestión de mantenimiento, así como un incremento de la disponibilidad y confiabilidad de los activos.

10 Bibliografía

[1] International Standard Organization. (2009). ISO 31.000:2009. *Risk Management – Principles and guidelines.* British Standards Institution. Convenio con UTFSM.

[2] International Standard Organization. (2019). ISO 31.010:2019. *Risk Management – Risk assesment techniques.* British Standards Institution. Convenio con UTFSM.

[3] International Estándar Organization. (2016). ISO 14.224:2016. *Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.* British Standards Institution. Convenio con UTFSM.

[4] Society of Automotive Engineers. (2009). SAE JA1011. *Evaluation criteria for reliability-centered Maintenance (RCM) processes.* Recuperado de: (https://dlscrib.com/download/sae-ja1011-evaluation-criteria-for-rcm-processes-agto-2009_5a7b8d65e2b6f553388c397c_pdf).

[5] Society of Automotive Engineers. (2002). SAE JA1012. *Una guía para la norma de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC).* Recuperado de: (https://www.academia.edu/38529540/Norma_sae_ja).

[6] Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.* Biblioteca digital USM.

[7] Moubray, J. (2004) *Mantenimiento centrado en la confiabilidad.* Recuperado de: (https://www.academia.edu/9478461/MANTENIMIENTO_CENTRADO_EN_LA_CONFIABILIDAD_CONTENIDOS).

[8] Serrano, A. (2021). *Neumática Práctica.* Biblioteca digital USM

[9] Wang, L; Chen, J; Hung, Y; Shammas, N. (2011) *Membrane and desalination technologies.* Biblioteca digital USM.

[10] Sterling Fluid Systems Group. (2003) *Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas.*

[11] Gallardo, F. (2019). *Propuesta de plan de mantenimiento en activos críticos de FABLAB universitario.* Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María.

[12] Fabio, E. (2021). *Diseño de propuesta de estrategia de mantenimiento en sala de máquinas de una empresa faenadora avícola.* Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María.

[13] Flores, C. (2019). *Creación de un proyecto de mejora en la gestión del mantenimiento para la unidad de mantención de la UTFSM Campus San Joaquín.* Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María.

[14] Barra, R. (2017). *Diseño de plan de mantenimiento para planta Desaladora con tecnología de osmosis inversa.* Trabajo para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial. Universidad Técnica Federico Santa María.

[15] Albornoz, A. (2018). *Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento a planta de osmosis inversa.* Trabajo de titulación para optar al título profesional de Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial. Universidad Técnica Federico Santa María.

[16] Acuña, L. (2019). *Plan de mantenimiento autónomo a equipo crítico de planta CCU Cachantun para implementación de pilar mantenimiento autónomo.* Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniería de Ejecución en Mecánica de Procesos y Mantenimiento Industrial. Universidad Técnica Federico Santa María.

[17] Thermal Engineering. *Precio generación de vapor.* Artículo técnico. Recuperado de: (http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/arti__culo___precio_generacio__n_vapor.pdf).

[18] O. Campos, G. Tolentino, M. Toledo, R. Tolentino. (2018). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos.* Instituto Politécnico Nacional de México. Recuperado de: (https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/html/).

11 Anexos

La presente sección presenta información adicional y relevante para el desarrollo del presente trabajo, y que podría resultar interesante para el lector.

11.1 Planta de osmosis inversa

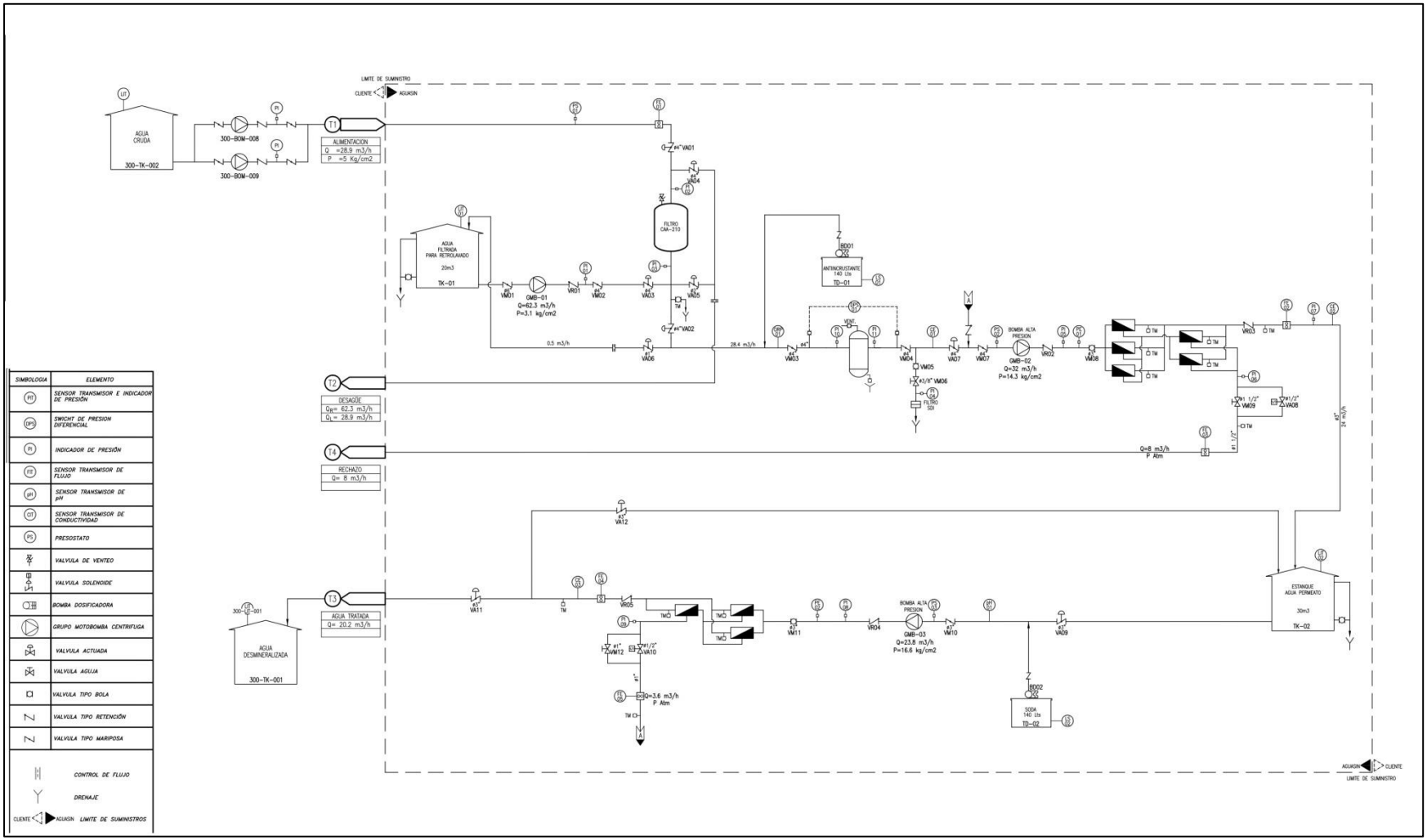


Figura 11.1: P&ID de la planta de osmosis inversa.

Fuente: EPSA.

11.2 Análisis FMEA

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observaciones**
Bomba de alta II etapa	Transportar el fluido para el proceso de osmosis inversa Elevar la presión del agua para el proceso de osmosis inversa Q=24 [m3/h] P= 16 [bar]	Cavitación	Baja presión de entrada	Desgaste del impulsor, pérdida de eficiencia	Pérdida de rendimiento (falla funcional)	Costo equipo: U$7.000 La falla del equipo puede generar un riesgo para la seguridad de los trabajadores dados los flujos, preisones y materiales que podrian desprenderse del equipo, sin embargo, al trabajar con agua, la falla no representa un riesgo mayor para el medioambiente.
		Recirculación de flujo	Funcionamiento inferior a los limites entregados por el fabricante	Cavitación	Bajo caudal de entrada (falla funcional)	
		Empuje radial/axial	Falla de descansos axiales/radiales, Variaciones de flujo	Desgaste de rodamientos y eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de rodamientos	Desgaste, desbalanceo, falta de lubricación	Aumento de temperatura, sonido de roce, aumento de vibraciones	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Rotura de sello	Desgaste, Empujes excesivos, recirculación, cavitación, sobre presión.	Pérdida de eficiencia del equipo	La bomba no levanta la presión deseada (falla potencial)	
		Falla de eje	Fatiga, desgaste, altas vibraciones	Desbalanceo dinámico, rotura del eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de motor	Sobrecalentamiento del motor, motor desenergizado	Falla funcional del equipo	Bomba no gira o no parte (falla funcional)	
		Desgaste de rodetes	Cavitación, desgaste normal del material, fluido muy abrasivo	Pérdida de eficiencia del equipo, y posterior falla funcional	La bomba no levanta la presión deseada (falla funcional)	

Tabla 11.1: Análisis FMEA para la bomba de alta presión de la II etapa de la osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observaciones**
Bomba de agua cruda	Transportar el fluido para el proceso de osmosis inversa Elevar la presión del agua para el proceso de osmosis inversa Q=28 [m3/h] P= 5 [bar]	Cavitación	Baja presión de entrada	Desgaste del impulsor, pérdida de eficiencia	Pérdida de rendimiento (falla funcional)	Costo equipo: U$3.000 La falla del equipo puede generar un riesgo para la seguridad de los trabajadores dados los flujos, preisones y materiales que podrian desprenderse del equipo, sin embargo, al trabajar con agua, la falla no representa un riesgo mayor para el medioambiente.
		Recirculación de flujo	Funcionamiento inferior a los limites entregados por el fabricante	Cavitación	Bajo caudal de entrada (falla funcional)	
		Empuje radial/axial	Falla de descansos axiales/radiales, Variaciones de flujo	Desgaste de rodamientos y eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de rodamientos	Desgaste, desbalanceo, falta de lubricación	Aumento de temperatura, sonido de roce, aumento de vibraciones	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Rotura de sello	Desgaste, Empujes excesivos, recirculación, cavitación, sobre presión.	Pérdida de eficiencia del equipo	La bomba no levanta la presión deseada (falla potencial)	
		Falla de eje	Fatiga, desgaste, altas vibraciones	Desbalanceo dinámico, rotura del eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de motor	Sobrecalentamiento del motor, motor desenergizado	Falla funcional del equipo	Bomba no gira o no parte (falla funcional)	
		Desgaste de rodetes	Cavitación, desgaste normal del material, fluido muy abrasivo	Pérdida de eficiencia del equipo, y posterior falla funcional	La bomba no levanta la presión deseada (falla funcional)	

Tabla 11.2: Análisis FMEA de la bomba de agua cruda que alimenta a la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observaciones**
Bomba de retrolavado	Transportar el fluido para el proceso de osmosis inversa Elevar la presión del agua para el proceso de osmosis inversa Q=28 [m3/h] P= 3 [bar]	Cavitación	Baja presión de entrada	Desgaste del impulsor, pérdida de eficiencia	Pérdida de rendimiento (falla funcional)	Costo equipo: U$3.000 La falla del equipo puede generar un riesgo para la seguridad de los trabajadores dados los flujos, preisones y materiales que podrian desprenderse del equipo, sin embargo, al trabajar con agua, la falla no representa un riesgo mayor para el medioambiente.
		Recirculación de flujo	Funcionamiento inferior a los limites entregados por el fabricante	Cavitación	Bajo caudal de entrada (falla funcional)	
		Empuje radial/axial	Falla de descansos axiales/radiales, Variaciones de flujo	Desgaste de rodamientos y eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de rodamientos	Desgaste, desbalanceo, falta de lubricación	Aumento de temperatura, sonido de roce, aumento de vibraciones	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Rotura de sello	Desgaste, Empujes excesivos, recirculación, cavitación, sobre presión.	Pérdida de eficiencia del equipo	La bomba no levanta la presión deseada (falla potencial)	
		Falla de eje	Fatiga, desgaste, altas vibraciones	Desbalanceo dinámico, rotura del eje	La bomba no gira, no transporta agua (falla funcional)	
		Falla de motor	Sobrecalentamiento del motor, motor desenergizado	Falla funcional del equipo	Bomba no gira o no parte (falla funcional)	
		Desgaste de rodetes	Cavitación, desgaste normal del material, fluido muy abrasivo	Pérdida de eficiencia del equipo, y posterior falla funcional	La bomba no levanta la presión deseada (falla funcional)	

Tabla 11.3: Análisis FMEA de la bomba de retrolavado.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
PLC	Mantener el control de los niveles de estanques	Daño de memoria	Temperatura, humedad y contaminación no controladas Problemas con las conexiones Falta de mantenimiento electrónico	Detención de equipo o planta	PLC no funciona (falla funcional)	Costo reemplazo: U$5.000 La falla del equipo no representa un riesgo a la seguridad de los trabajadores ni el medioambiente
	Comandar la partida/detención de los equipos	Falla de módulo de comunicación				
	Controlar la apertura/cierre de válvulas	Falla de fuente de poder				
	Controlar la dosificación de químicos	Falla de módulo de entrada/salida				

Tabla 11.4: Análisis FMEA para el PLC de la planta de osmosis.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Sistema de tuberias	Transportar el fluido de trabajo sin fugas ni filtraciones	Fugas leves/moderadas	Alzas de presión, desgaste de empaquetaduras, desgaste de tubos	fuga parcial del fluido	Parte del flujo no llega a destino (Falla funcional)	La falla funcional representa un riesgo para la seguridad de los trabajadores, más no para el medioambiente porque sólo se transporta agua
		Rotura de tubo	Alzas de presión, desgaste de empaquetaduras, desgaste de tubos Falta de mantenimiento	Fuga total del fluido	El flujo no llega a destino (Falla funcional)	

Tabla 11.5: Análisis FMEA para el sistema de piping de la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Filtro de cartucho	Filtrar microparticulas Aliviar la carga filtrante de las membranas SDI < 5 [%/min] ΔP < 30 [psi]	Saturación	Desgaste del filtro por exceso de particulas	Aumento del diferencial de presión Pérdida de eficiencia de la planta	No disminuye la cantidad de sedimentos en el agua (falla funcional)	Costo reemplazo: U$ 60 La falla del equipo no representa un riesgo a la seguridad de las personas ni el medioambiente
		Rotura del housing	Sobre presiones	Fugas de agua, perdiendo eficiencia	El agua llega con poca presión a las membranas (falla funcional)	

Tabla 11.6: Análisis FMEA para los filtros de cartucho de 1 micra.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Tubos y membranas RO	Contener membranas y agua de proceso Realizar el proceso de osmosis inversa Conductividad final= 0,4 [µS/cm] SDI < 5 [%/min] Qpermeado= 75% Qentrada	Rotura de tubo	Pérdida de capa superficial del tubo	El agua escapa hacia el exterior	No toda el agua va a osmosis inversa (falla funcional)	Costo reemplazo por tubo: U$5.000 La rotura de un tubo portamembrana representa un riesgo serio para la seguridad del personal, más no para el medioambiente
			Sobre presiones			
		Fugas	Falla de sellos	Pérdida de eficiencia	No toda el agua va a osmosis inversa (falla funcional)	
			Falla en las coplas y uniones			
		Saturación de membrana	Desgaste	Disminución flujo permeado Aumento de presiones de trabajo	No toda el agua va a osmosis inversa (falla funcional)	

Tabla 11.7: Análisis FMEA para las membranas de osmosis inversa y tubos porta membranas.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Bombas dosificadoras	Inyectar soda Inyectar antiincrustante	Obstrucción filtro succión	Suciedad en el filtro	Pérdida de eficiencia	La bomba no es capaz de inyectar soda o antiincrustante (falla funcional) La bomba no inyecta suficiente cantidad de químico (disminución de pulsos - falla funcional)	Costo equipo: U$700 La falla del equipo puede generar un riesgo serio para los trabajadores y el medioambiente al trabajar con químicos, pero éste puede ser controlado
		Fugas en la succión	Rotura en tuberia por desgaste	Pérdida de eficiencia		
		Baja presión de aspiración	Bajo nivel de estanque	Pérdida de eficiencia		
		Falla válvula de retención	Falta de limpieza Rotura de válvula	Falla funcional		
		Falla en la membrana	Desgaste	Falla funcional		

Tabla 11.8: Análisis FMEA para las bombas dosificadoras de químicos del proceso de RO.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdidad de funcionalidad**	**Observación**
Compresor	Suministrar aire para instrumentación y actuadores Mantener presión en el sistema neumático (7-8 bar)	Rotura/desgaste de correa	Fatiga, desgaste, mala instalación	Tornillos no giran	El equipo no es capaz de comprimir aire (falla funcional)	Costo equipo: U$7.000 Fallas con poco riesgo en seguridad y medioambiente
		Desgaste de rodamientos	Mala lubricación, trabajo a alta t°	Aumento de t° El equipo no gira		
		Fuga de aceite	Falla en mangueras	Contaminación del aire falla en rodamientos		
		Sensor de tapa oriente	Cierre de tapa muy brusco, limpieza con exceso de aire	El equipo se detiene o no parte		
		PLC	Falta de limpieza	El equipo no parte		
		Desbalanceo de ventilador	Falta de limpieza	Aumento de vibraciones y ruido El equipo se detiene		
		Cableado eléctrico	Falta de limpieza	El equipo se detiene o no parte		
		Falla de eje	Desgaste, fatiga, falta de lubricación	Aumento de vibraciones, temperatura,ruido, El equipo se detiene		
		Falla de tornillos de compresión	Desgaste, fatiga, falta de lubricación	El equipo no es capaz de comprimir aire El equipo no parte		

Tabla 11.9: Análisis FMEA para los compresores de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Secador	Deshumidificar el aire mediante refrigeración y punto de rocío	Falla por sobrecalentamiento del equipo	Falta de limpieza poca ventilación	Detención repentina del equipo	El aire va a proceso con porcentaje de humedad (falla funcional)	Costo equipo: U$5.000 La falla del equipo no representa un riesgo para la seguridad de las personas ni el medioambiente
		Falla de ventilador	Desbalanceo por polvo Falla eléctrica	No hay rechazo de aire caliente		
		Condensado en tuberias	Limpieza del condensador Temperatura ambiente	Aire con mayor humedad		
		Falla en drenaje	Filtro obturado Mala posición del elemento flotante	Aire con mayor humedad		
		No sale aire comprimido	Intercambiador de calor congelado Baja t° ambiente Fuga de gas refrigerante	Pérdida de presión en el acumulador		

Tabla 11.10: Análisis FMEA para los secadores de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Filtros de aire	Captar contaminación en forma de polvo Captar contaminación de aceite Captar gotas de humedad	Filtro saturado	Desgaste, cumplimiento de vida util	El aire con mayor contaminación daña los elementos neumáticos	El aire presenta mayor contaminación (falla funcional)	Costo filtro: U$ 90 La falla de un filtro no representa un riesgo para la seguridad ni el medioambiente

Tabla 11.11: Análisis FMEA para los filtros de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Acumulador	Retener aire comprimido Mantener presurizado el aire (7-8 bar) Purgar el poco condensado que el fluido pudiese tener	Fuga	Desgaste del material	Pérdida de eficiencia	Cuesta mantener presión en el sistema (falla funcional)	La rotura del equipo puede ser catastrófica para la seguridad
		rotura de equipo	Falta de mantenimiento	Todo el aire se fuga repentinamente	El equipo no mantiene presión (falla funcional)	

Tabla 11.12: Análisis FMEA para el acumulador de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)						
Equipo	**Funciones**	**Modos de falla**	**Causas**	**Consecuencias**	**Pérdida de funcionalidad**	**Observación**
Filtro CAA	Declorar el agua Filtrar grandes elementos Filtrar elementos orgánicos Contener y transportar fluido	Desgaste de los elementos filtrantes	Falta de retrolavado	Aumento de los niveles de cloro	Aumento de niveles de cloro (Falla funcional)	Costo de equipo U$10.000 La falla del equipo no genera un alto riesgo para la seguridad de los colaboradores, ni representa un riesgo elevado al medioambiente.
			Exceso de retrolavado	Fuga de agua y/o de elementos filtrantes		
			Desgaste natural			
		Filtración en tuberia	Desgaste de empaquetaduras		Pérdida de fluido (Pérdida de eficiencia)	
			Rotura de tuberias			
		Filtración en estanque	Sobre presiones		Pérdiad de fluido (Pérdida de eficiencia)	
			Desgaste del estanque			

Tabla 11.13: Análisis FMEA para el filtro de carbón activado.

Fuente: Elaboración propia.

11.3 Análisis de criticidad

Equipo:	Bomba de alta presión II etapa		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**3**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**12**

Tabla 11.14: Análisis de criticidad de la bomba de alta presión de la II etapa de la RO.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bomba de agua cruda		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**3**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**2**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**3**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**9**

Tabla 11.15: Análisis de criticidad para las bombas de agua cruda.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bomba de retrolavado		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
4			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**0**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**3**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**6**

Tabla 11.16: Análisis de criticidad para la bomba de retrolavado.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	PLC		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**10**

Tabla 11.17: Análisis de criticidad del PLC de la planta de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Tuberias
Calificación	Descripción	Escala	Criticidad asignada
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	**3**
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	**1**
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidad de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	**2**
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	**1**
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**7**

Tabla 11.18: Análisis de criticidad del sistema de piping de la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Sensor/transmisor
Calificación	Descripción	Escala	Criticidad asignada
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	**1**
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	**0**
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	**0**
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	**2**
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**3**

Tabla 11.19: Análisis de criticidad de la instrumentación de la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Filtro CAA
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**11**

Tabla 11.20: Análisis de criticidad del filtro de carbón activado.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Filtros de cartucho
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**2**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**1**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**5**

Tabla 11.21: Análisis de criticidad del filtro de cartucho de 1 micra.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Tubos y Membranas RO		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**3**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**12**

Tabla 11.22: Análisis de criticidad de las membranas de RO y tubos porta membranas.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:	Bombas dosificadoras		
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**0**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**1**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**5**

Tabla 11.23: Análisis de criticidad de las bombas dosificadoras de químicos.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Manómetros
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**0**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**0**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**0**

Tabla 11.24: Análisis de criticidad de los indicadores de presión.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Switch de presión
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**0**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**1**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**1**

Tabla 11.25: Análisis de criticidad de los Presóstatos presentes en la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Compresores
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**3**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**4**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**12**

Tabla 11.26: Análisis de criticidad de los compresores de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Secadores
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
Riesgo en seguridad			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Riesgo al medio ambiente			
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**1**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio			
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**0**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
Costo de repación - Reemplazo			
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**4**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
Nivel de criticidad asignado al equipo			**6**

Tabla 11.27: Análisis de criticidad de secadores de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Filtros de aire
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	**0**
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	**1**
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	**0**
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	**0**
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**1**

Tabla 11.28: Análisis de criticidad de los filtros de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Acumulador de aire
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	**4**
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	**0**
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	**4**
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	**1**
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**9**

Tabla 11.29: Análisis de criticidad de los acumuladores de aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo:			Tk agua permeato
Calificación	**Descripción**	**Escala**	**Criticidad asignada**
	Riesgo en seguridad		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	0	**2**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Riesgo al medio ambiente		
Nulo	La falla del equipo no genera un riesgo perceptible al medioambiente	0	**0**
Bajo	La falla del equipo genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	1	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero éste puede ser controlado	2	
Alto	La falla del equipo genera un riesgo de daños al medioambiente que no puede controlarse	3	
Muy alto	La falla del equipo genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	4	
	Pérdidas de producción - Tiempo fuera de servicio		
Nulo	La falla del equipo no produce detenciones de los procesos críticos	0	**2**
Bajo	La falla del equipo provoca la detención de procesos críticos menores a 15 minutos	1	
Moderado	La falla de equipo provoca una detención de procesos críticos mayores a 15 minutos y menores a 30 minutos	2	
Alto	La falla del equipo genera una detención de procesos críticos mayores a 30 minutos y menores a 2 horas	3	
Muy alto	La falla del equipo provoca detenciones de procesos críticos por más de 2 horas	4	
	Costo de repación - Reemplazo		
Nulo	El costo esperado de reemplazo es inferior a US$100	0	**3**
Bajo	El costo esperado de reemplazo esta entre US$100 y US$1.000	1	
Moderado	El costo esperado de reemplazo esta entre US$1.000 y US$2.500	2	
Alto	El costo esperado de reemplazo esta entre US$2.500 y US$5.000	3	
Muy alto	El costo esperado de reemplazo es mayor a US$5.000	4	
	Nivel de criticidad asignado al equipo		**7**

Tabla 11.30: Análisis de criticidad del estanque de agua permeada.

Fuente: Elaboración propia.

11.4 Auditoría 5S planta desmineralizadora

AUDITORÍA 5S

FORMATO ESTANDAR

ÁREA | SECTOR: Planta Osmosis

FECHA: 28-5-2021

AUDITOR: Cristián Martínez M

PUNTAJE: 29

1°S: CLASIFICACIÓN		DECIDIR QUE ES NECESARIO Y ELIMINAR LO QUE NO SE NECESITA		
	ÍTEM A CHEQUEAR	PREGUNTAS	PUNTAJE	OBSERVACIONES PARA MEJORAR
1.	Materiales que no se necesitan en el lugar de trabajo: pallets, cajas, materia prima, consumibles, productos terminados, etc.	Que no existan en el área de almacenamiento tambores o pallets que no sean necesarios. Que en el área de trabajo sólo existan productos y consumibles estrictamente necesarios para el turno diario de producción.	2	
2.	Materiales no necesarios como herramientas, fungibles, material de soporte o accesorios.	Que no existan en el área de trabajo herramientas, fungibles o accesorios (llaves, guantes...). Que sea posible distinguir entre los ítems necesarios y los que no. Los armarios deben estar completamente libres de ítems sin usar. No deben existir herramientas en los lockers personales. Los lockers personales no deben estar en el área de trabajo.	2	

2°S: ORGANIZACIÓN		DEFINIR UN LUGAR ESPECÍFICO PARA CADA ÍTEM A USAR		
	ÍTEM A CHEQUEAR	PREGUNTAS	PUNTAJE	OBSERVACIONES PARA MEJORAR
1.	Identificación de unidades de producción, tuberías, máquinas, condiciones de manejo y flujo.	Unidades de producción, talleres, máquinas, tuberías, líneas de producción y procesos deben estar claramente identificados y visualmente descritos. Las condiciones de seguridad que deben ser respetadas deben estar claramente marcadas con un sistema de control visual.	1	→ Identificar al 100%
2.	Definición de las áreas de pisos, pasadizos, areas de almacenamiento para materiales y productos terminados. Lugar y abastecimiento de ítems en estantes o racks de almacenamiento (consumibles, caños, cintas, etc.)	Las áreas de almacenamiento, pasos de peatones y vías de paso deben estar visualmente pintadas con colores específicos. Todo el almacenamiento debe llevarse a las áreas indicadas. Las vías de paso deben estar despejadas y las areas peligrosas; tanto las grúas, como las rampas y pasos deben ser identificados con sólo echar una mirada. Todos los recipientes dispuestos deben estar visualmente identificados. Etiquetas y lugares legibles son respetados. Las cantidades mínimas y máximas son identificadas y respetadas.	1	→ Falta Layout del Lugar.
3.	Organización de herramientas, materiales de soporte y accesorios de máquinas. Lugares para EPI/EPP y materiales de seguridad.	Las herramientas están ahora en el lugar adecuado y son visibles a primera vista. Los lugares de las herramientas estan visualmente controlados, con marcas legibles de sus dimensiones o condiciones para uso. EPI/EPP disponibles en todos los lugares del área de trabajo, específicamente, claramente identificados y en lugares visibles. Se debe implementar un sistema de control/reposición.	2	
4.	Presencia de documentos necesarios en la unidad de producción en las estaciones de trabajo (documentos EHS, formularios de trabajo, instrucciones de trabajo, etc.)	Los avisos e informaciones estan al día. Las hojas están alineadas y bien puestas, los documentos están claros y legibles. No existen rasgaduras en las esquinas o pedazos de papel de adhesivos que permanezcan previos a las notas o avisos.	2	
5.	Plan de limpieza de equipos	Existen lugares claramente definidos y visualizados para la limpieza de instrumentos, materiales y equipos, con material disponible donde sea necesario, en diferentes puntos del lugar de trabajo. Todos los elementos están señalizados.	2	→ Realizar Separación.
6.	Accesos de emergencia y zonas peligrosas	Deben permanecer despejadas las salidas de emergencia y los extintores, accesibles. Permanecer cerradas las salidas de emergencia (incendio) y los equipos bien pintados y fácilmente visibles.	2	
7.	Manejo de desperdicios	El almacenamiento y clasificacion de desperdicios esta claramente definido y visiblemente indicado.	1	→ Falta Marcar Domiciliario.

CRITERIOS DE PUNTUACION (sólo 0, 1 o 2)		
	Todo bajo control. El sistema está perfectamente integrado.	2 puntos
	Metodología 5S ha sido ampliamente implementada. Algunos errores remanentes.	1 punto
	Necesidad de mejoras. Falta de disciplina operacional, incluso si ya se ha implementado la metodología 5S	0 puntos

AUDITORÍA 5S

FORMATO ESTÁNDAR

SUPERAR 5S

3°S: LIMPIEZA			MANTENER LIMPIO EL LUGAR DE TRABAJO Y ELIMINAR ANORMALIDADES	
	ÍTEM A CHEQUEAR	PREGUNTAS	PUNTAJE	OBSERVACIONES PARA MEJORAR
1.	Limpieza de estaciones de trabajo, máquinas, equipos, accesorios y tuberías. Eliminación de fuentes de suciedad y contaminación	Las estaciones de trabajo, máquinas y tuberías estan limpias. Equipos, accesorios de las maquinas, herramientas y estantes estan limpios.	2	
2.	Limpieza de pisos y áreas de desecho	No deben haber desperdicios, suciedad o aceite en el piso. Los bins de desperdicios o contenedores no deben rebalsar. No debe existir riesgo de resbalar. No debe existir pasta en el piso. No debe existir desperdicio en ductos, o escaleras. No deben existir tubos o cables sucios.	2	
3.	Comportamientos de limpieza y reglamento	Las programadas actividades de limpieza son llevadas a cabo de acuerdo al plan. Las ropas de trabajo estan limpias. El criterio de limpieza están en el display de cada máquina. Los vestidores, de la misma forma que todos los lugares de trabajo estan limpios y bien mantenidos.	0	se debe dejar Constancia

4°S: ESTANDARIZACIÓN			CREAR UN LUGAR DE TRABAJO VISIBLEMENTE MANEJADO	
	ÍTEM A CHEQUEAR	PREGUNTAS	PUNTAJE	OBSERVACIONES PARA MEJORAR
1.	Estándares visuales para marcar, señalética y manejo de herramientas	Lugares para el despliegue de avisos son normalizados y estos no son pegados arbitrariamente. Las personas responsables para poner el día estos avisos estan claramente definidas. Equipos, instalaciones y repuestos de máquinas son marcados con codigos definidos.	1	→ Falta layout identificación válvula.
2.	Estándares de orden y limpieza	Limpieza y estándares de limpieza son exhibidos e integrados a las actividades del equipo diariamente (quien lo hace, cuó y cuándo).	2	
3.	Estándares de procedimientos de operación de producción, seguridad y calidad	El proceso está definido por estandares visuales claros que se respetan. El mal funcionamiento del proceso se puede apreciar a simple vista. Se han desarrollado sistemas de pruebas de errores para prevenir operaciones peligrosas o fallas.	1	→ Falta definiciones Técnicas de uso.

5°S: SUSTENTACIÓN			DESEMPEÑO SUSTENTABLE Y AMPLIA REALIZACION DE MEJORAS	
	ÍTEM A CHEQUEAR	PREGUNTAS	PUNTAJE	OBSERVACIONES PARA MEJORAR
1.	Programa 5S con Comité de Gerencia y un Comité Guía	Programas de auditoría de Comité Guía y resultados para todas las unidades de producción y todas las prioridades de los equipos se exponen en un lugar compartido por todos los colaboradores.	1	→ Falta colocar Resultado
2.	Entrenamientos 5S y actividades del grupo. Auditorías y seguimientos	Todos toman parte en las actividades 5S y cada equipo es responsable por área. Se dedica algún tiempo a las actividades 5S. Se muestran fotos de los miembros del equipo en las tablas de actividades junto con los planes de accion del equipo. Se hacen auditorías regularmente y guías para mejorar proyectos o planes de accion. Estos son exhibidos con responsabilidades específicas compartidas entre sus miembros.	2	
3.	Ideas para mejorar, resolucion de problemas y proyectos de acción	Todas las publicaciones o emisiones identificadas estan sujetas a proyectos de mejoramiento y exhibiciones en tablas de actividad. Las anormalidades estan sujetas a procesos de claro mejoramiento. Los planes de accion son compartidos entre los miembros del equipo y son mostradas en la tabla de actividades del equipo.	2	
4.	Indicadores de rendimiento	Los indicadores de rendimiento son seguidos por los equipos y progresos de los planes de accion 5S relativos a un indicador de proceso y a un indicador financiero.	1	Falta indicador Financiero

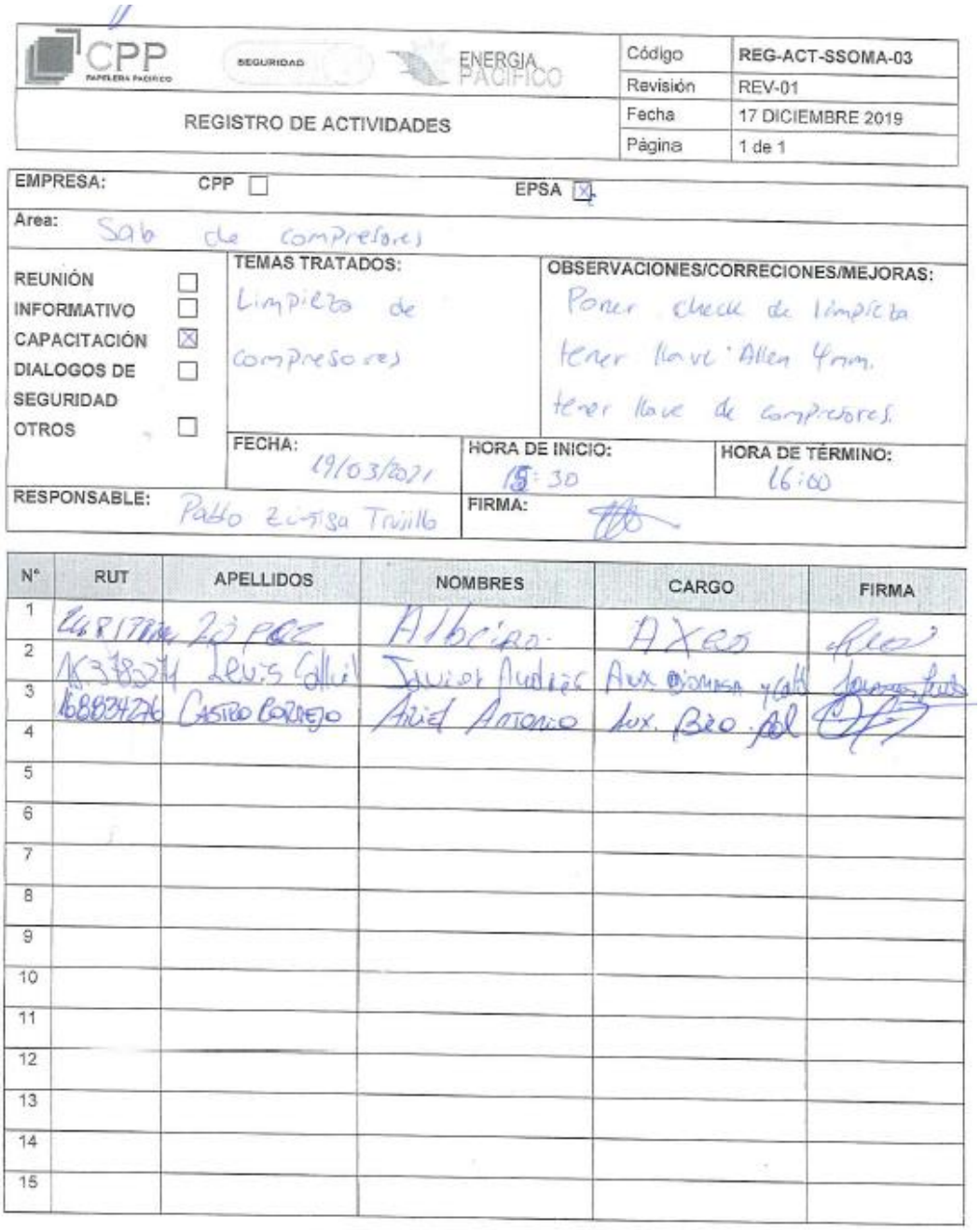
PUNTAJE TOTAL : 29 ÷ 38 = 76,3 %

CRITERIOS DE PUNTUACION (sólo 0 , 1 o 2)		
	Todo bajo control. El sistema está perfectamente integrado	2 puntos
	Metodología 5S ha sido ampliamente implementada. Algunos errores remanentes	1 punto
	Necesidad de mejoras. Falta de disciplina operacional, incluso si ya 5S ha implementado la metodología 5S	0 puntos

Figura 11.2: Auditoría 5S realizada a la planta de osmosis inversa.

Fuente: EPSA.

11.5 Capacitaciones



CPP PAPELERA PACIFICO — SEGURIDAD — ENERGIA PACIFICO

REGISTRO DE ACTIVIDADES	Código	REG-ACT-SSOMA-03
	Revisión	REV-01
	Fecha	17 DICIEMBRE 2019
	Página	1 de 1

EMPRESA: CPP ☐ EPSA ☒

Area: Sala de compresores

REUNIÓN ☐
INFORMATIVO ☐
CAPACITACIÓN ☒
DIALOGOS DE SEGURIDAD ☐
OTROS ☐

TEMAS TRATADOS: Limpieza de compresores

OBSERVACIONES/CORRECIONES/MEJORAS: Poner check de limpieza tener llave Allen 4mm. tener llave de compresores.

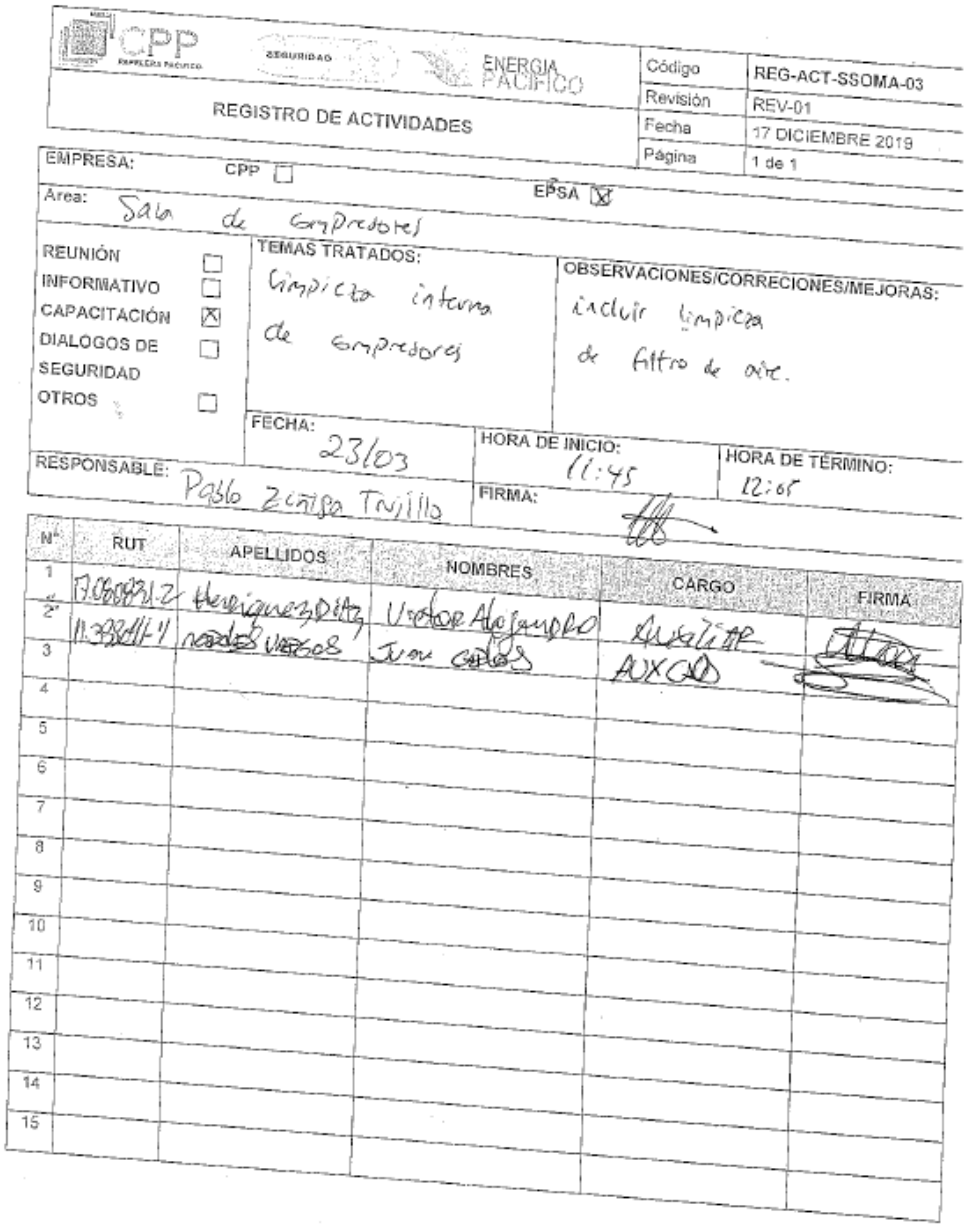
FECHA: 19/03/2021 — HORA DE INICIO: 15:30 — HORA DE TÉRMINO: 16:00

RESPONSABLE: Pablo Zúñiga Trujillo — FIRMA:

N°	RUT	APELLIDOS	NOMBRES	CARGO	FIRMA
1	24817[illegible]	[illegible]	Alberto	Axes	[illegible]
2	16378[illegible]	Lewis Gallil	Javier Andrés	Aux. [illegible] y Gal	[illegible]
3	168834276	Castro Cornejo	Ariel Antonio	Aux. Bio. Pol	[illegible]
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Figura 11.3: Capacitación de limpieza interna de compresores a uno de los turnos de los operadores.

Fuente: Elaboración propia.



CPP EMPRESA PACIFICO — SEGURIDAD — ENERGIA PACIFICO

Código	REG-ACT-SSOMA-03
Revisión	REV-01
Fecha	17 DICIEMBRE 2019
Página	1 de 1

REGISTRO DE ACTIVIDADES

EMPRESA: CPP ☐ EPSA ☒

Area: Sala de compresores

REUNIÓN ☐
INFORMATIVO ☐
CAPACITACIÓN ☒
DIALOGOS DE SEGURIDAD ☐
OTROS ☐

TEMAS TRATADOS: limpieza interna de compresores

OBSERVACIONES/CORRECIONES/MEJORAS: incluir limpieza de filtro de aire.

FECHA: 23/03

HORA DE INICIO: 11:45

HORA DE TÉRMINO: 12:05

RESPONSABLE: Pablo Zúñiga Trujillo

FIRMA:

Nº	RUT	APELLIDOS	NOMBRES	CARGO	FIRMA
1	17.080891-2	Henriquez Diaz	Victor Alejandro	Auxiliar	
2	11.338411-4	[illegible] Vargas	Juan Carlos	AUXCAD	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Figura 11.4: Capacitación de limpieza interna de compresores realizada a los operadores.

Fuente: Elaboración propia.

11.6 Árbol de componentes

11.6.1 Compresores

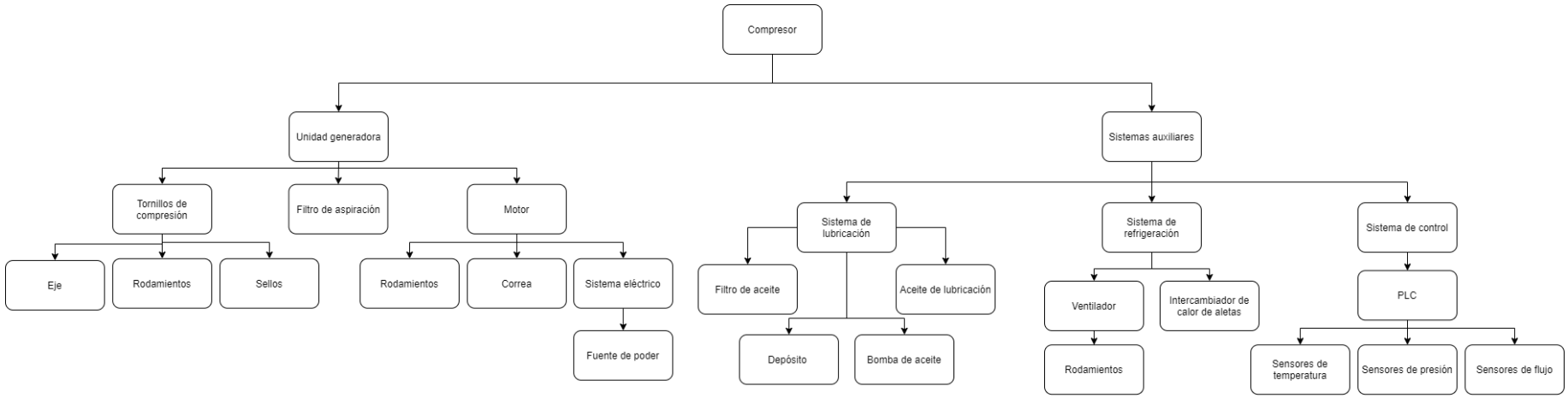


Figura 11.5: Árbol de componentes de un compresor de tornillo.

Fuente: Elaboración propia.

11.6.2 Bomba

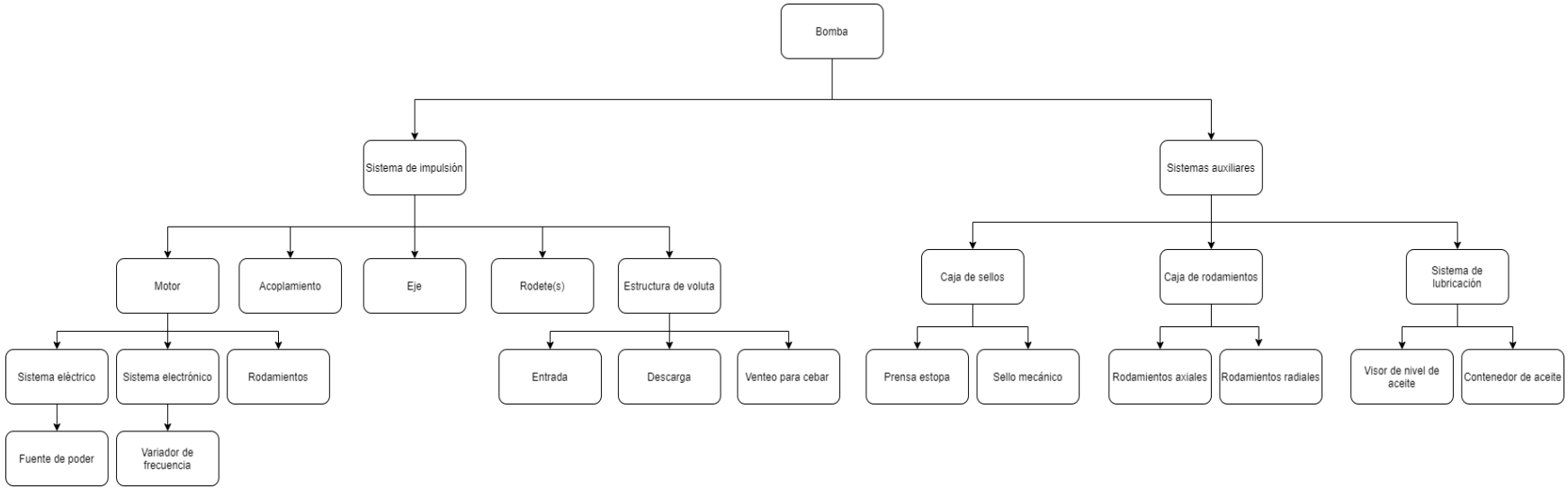


Figura 11.6: Árbol de componentes de una bomba centrífuga.

Fuente: Elaboración propia.

11.6.3 Filtro de carbón activado

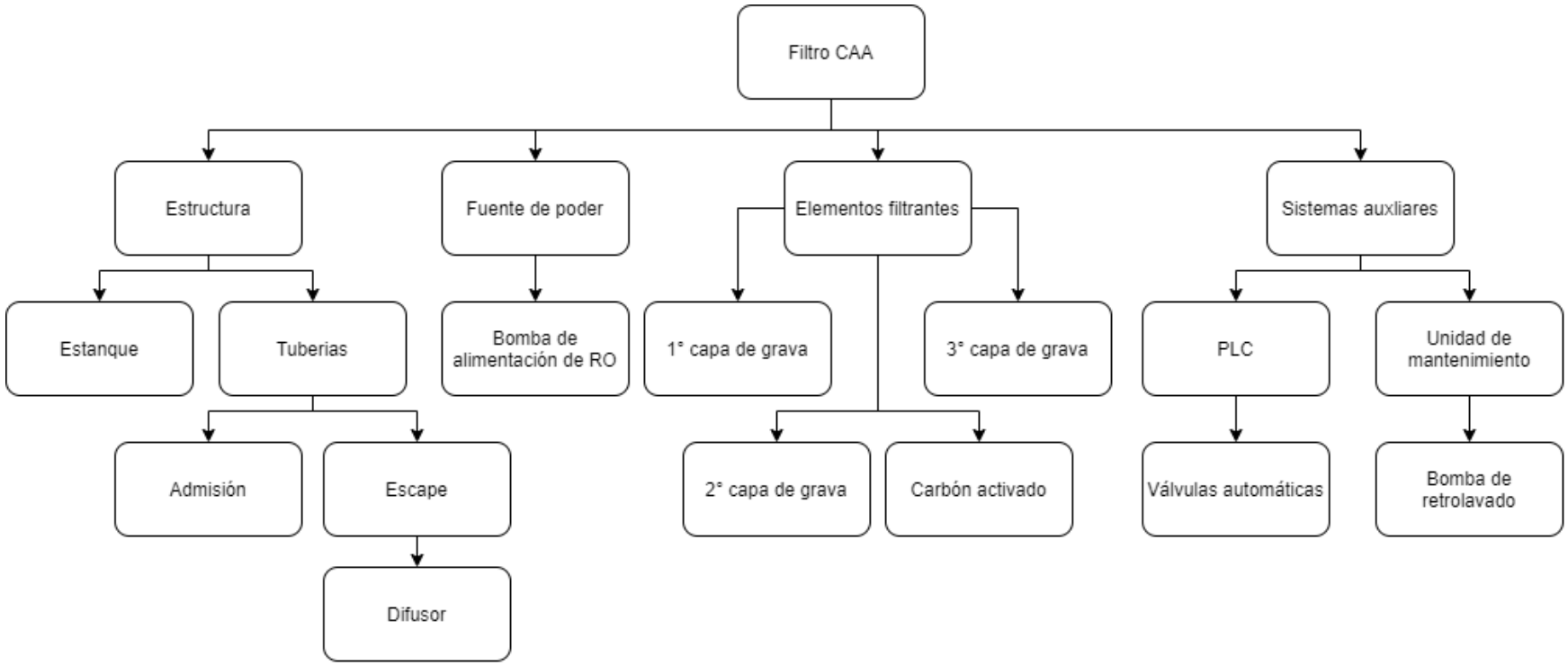


Figura 11.7: Árbol de componentes del filtro CAA de la planta desmineralizadora.

Fuente: Elaboración propia.

11.6.4 Membranas de Osmosis inversa

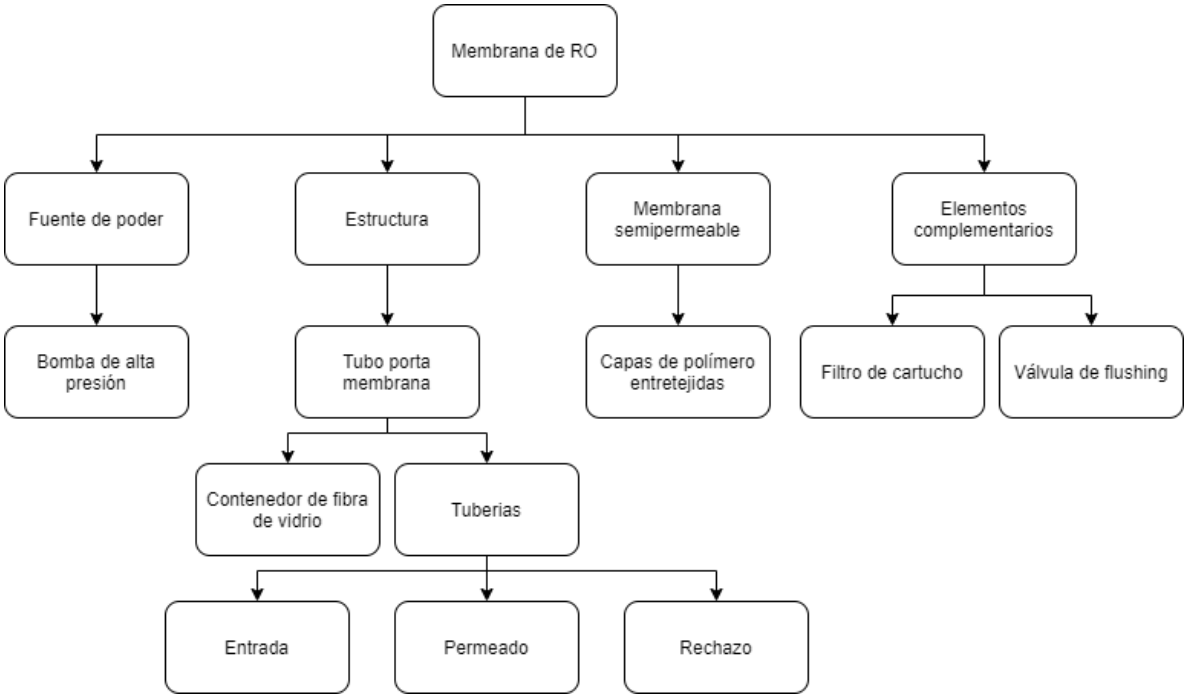


Figura 11.8: Árbol de componentes de una membrana de osmosis inversa.

Fuente: Elaboración propia.