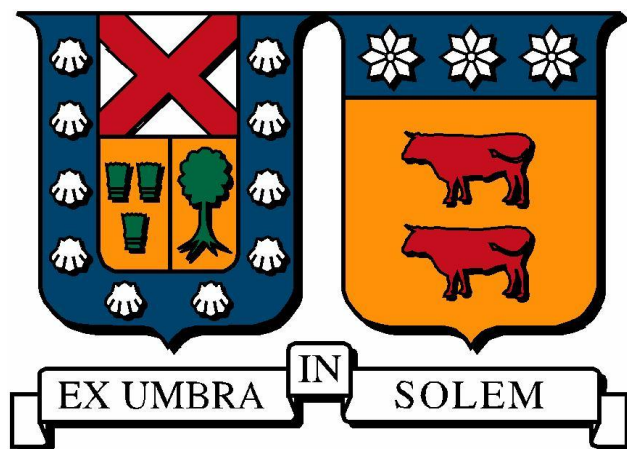


Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Civil Mecánica

Santiago – Chile



Propuesta de mejora en estrategia de mantenimiento para equipos críticos de servicios industriales en planta de producción de cerveza

Sebastián Andrés Hidalgo Parada

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO MENCIÓN PRODUCCIÓN

Profesor guía: Ing. Luis Guzmán Bonet

Profesor Co-referente: Ing. Nelson Álvarez Campillay

Abril - 2021

“Siempre siguiendo hacia adelante, aunque sea por inercia.”

Agradecimientos

Al minuto que escribo esto, se me viene a la mente una lista extensa de personas a las cuales podría agradecerles por la existencia de este libro. Y es que el proceso que me llevó a ser quien soy ahora empezó desde joven, y hoy cada aspecto de mi persona se le puede atribuir la interacción que he tenido con cada una de las siguientes personas.

Podría empezar por mis amigos del colegio, que me brindaron su amistad de forma incondicional durante los tiempos más turbulentos de la adolescencia; Bruno, Hans, Javier, José Tomás, Pablo, José “Dobli”. ¡Gracias por el apañe y la música!

A mis compañeros de la universidad, quienes me acompañaron en mis puntos de inflexión de aprendizaje tanto académico como personal, Abril, Alex, Camila, Camilo, David, Joaquín, Jose; cabros, gran parte de lo que soy se los debo a cada uno de ustedes, en su justa medida.

A mi infinitamente querido Coro USM y a nuestra directora, que me alimentaron el corazón con música y experiencias impagables; fueron aquella fuente de felicidad por la cual estaré siempre agradecido. Y para aquellos entendidos; que recuerden los incontables litros de cerveza compartida, que se vendrán muchos litros más. *Prost!*

A mi familia que siempre estuvo como apoyo incondicional durante todos los procesos, buenos y malos, que tuve que afrontar. A mi padre Nelson, a mi madre Patricia, a mi hermana Pauli y a mi abuelita Quena. Y para el resto de mi familia. Los amo.

Especial agradecimiento a todos y todas que pasaron por mi vida, aunque haya sido de forma tangencial, si lees esto y tuviste el agrado (o no) de conocerme, sabe que te recuerdo y en parte agradezco por haber estado en mi vida.

Finalmente, a los profesores Luis y Nelson. Por sus enseñanzas e inspiración tanto a nivel profesional como personal.

¡Salud!

Resumen

TurMec es una de las plantas productoras de cerveza más grande del mundo; una empresa multinacional que opera en más de 150 países alrededor del mundo y Chile no es la excepción. Su sucursal chilena funciona bajo el nombre de Cervecería TMC desde 1993, y se encarga de la producción tanto de marcas nacionales como internacionales.

La planta cuenta con distintas áreas que cumplen con las funciones industriales desde la recepción de materias primas hasta la logística de los productos terminados. Una de las áreas más importantes, el núcleo de la fábrica es la de Elaboración y Servicios (EyS), que se encarga del proceso cervecero directo de las marcas antes mencionadas. Esta área cuenta con una planta de suministros de servicios industriales, suministros que facilitan y hacen posible la producción de cerveza. Los servicios incluyen; la generación de vapor, generación de aire comprimido, captación y tratamiento de CO₂, y generación de frío (mediante ciclo de amoníaco).

En el último tiempo, la planta se ha visto sujeta a cambios de infraestructura y layout radicales. Con la incorporación de nuevas miniplantas y equipos se espera que se logre un aumento en la producción de hasta el 300%. Estos cambios han afectado a todas las áreas, incluyendo al área de Servicios, y es razón por la cual se genera una oportunidad para realizar un plan de adaptación y mejora de las actuales políticas de mantenimiento que rigen al área.

A raíz de los cambios a los cuales se vio sometida la planta de generación de servicios es que se decide realizar un estudio sobre la actual estrategia de mantenimiento, evaluar las actuales estrategias y técnicas que se aplican en los equipos del área, y dar inicio al proceso de implementación de enfoques de mantenimiento que garanticen no solo el correcto cumplimiento de normas que otorgan altos estándares de mantenimiento enfocados en RCM y TPM, sino que también aseguran el cumplimiento de las normas de seguridad internas de la misma planta para sus trabajadores.

El presente estudio se realiza en base a una simulación de las condiciones de funcionamiento y falla que pueden ocurrir en una fábrica convencional. Es a partir de esta información que se realiza el estudio de mejora para identificar las oportunidades de mejoramiento y se gestan las correspondientes propuestas.

Abstract

TurMec is the largest brewing company in the world, it is a multinational company spanning over 150 countries worldwide, and Chile is no exception. The Chilean firm operates by the name Cerveceria TMC since 1993 and it is responsible for the production of its local and international brands.

The factory has a variety of areas which meet with the different industrial functions from receiving raw material to take over the logistics of the finished products. One of the most important area, the core of the company, is the Brewing area which is responsible for the direct brewing processes of the aforementioned brands. This part of the plant counts with an additional area of industrial services which facilitates and makes possible the brewing process. These utilities include steam generation, compressed air generation, capture and treatment of CO₂, and cold generation (through ammonia closed cycle).

Over the last few years, the factory has been subjected to radical infrastructural and layout changes. Along with the inclusion of new mini-plants and equipment it is expected to achieve an increase up to 300% of the current production. These changes have had an important impact on every area, including the Utilities one, and that is why a maintenance-policy-adapting-and-improvement-plan-realization opportunity has risen for the area.

Due to the aforementioned changes to the Utilities sector, it is decided to carry out a study over the current maintenance policy, assess the existing techniques and tactics applied to the equipment and lead off to a new maintenance approach implementation process that will not only guarantee the proper compliance of high maintenance standard norms focused on RCM and TPM, but will assure the inner safety policy of the plant, and compliance for its own workers.

The present study is conducted via a simulation-based gathering of data from any failure and functioning conditions that may be observed inside a traditional factory-like system. From that data, a continuous improvement study may be executed in order to identify any improvement opportunity and come up with the corresponding proposals.

Glosario

DMAIC: *Ciclo de Mejora*; Definir-Medir-Analizar-*(Improve)* Mejorar-Controlar.

PHVA: Ciclo de calidad; Planificar-Hacer-Verificar-Actuar.

TPM: *(Total Productive Maintenance)* Mantenimiento Productivo Total.

MTTR: *(Mean Time To Repair)* Tiempo Medio de Reparación.

MTBF: *(Mean Time Between Failure)* Tiempo Medio entre Fallas.

RCM: *(Reliability Centered Maintenance)* Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

RBM: *(Risk Based Maintenance)* Mantenimiento Basado en el Riesgo.

FMECA: *(Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis)* Análisis de modo falla, efecto y criticidad.

PI: *(Performance Indicator)* Indicador de Rendimiento.

KPI: *(Key Performance Indicator)* Indicador Clave de Rendimiento.

SAP: *(System Analysis Program)* Programa de Análisis de Sistemas.

Quick Win: *(Victoria Rápida)* Aquellas actividades tempranas que pueden ser realizadas de forma rápida y sin mayor dificultad dentro del contexto de un proyecto.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract	5
Glosario	6
Tabla de contenidos	7
Índice de figuras	9
Índice de tablas	10
Índice de ecuaciones	11
Introducción.....	13
Descripción del problema	13
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Capítulo 1	16
1. Metodología de trabajo.....	17
1.1. Presentación del problema	18
1.2. Marco teórico	18
1.3. Diagnóstico de la situación actual de la planta y sus equipos	18
1.4. Estudio de estrategia de mantenimiento	19
1.5. Resultados	19
1.6. Conclusiones	19
Capítulo 2	20
2. Antecedentes	21
2.1. La empresa	21
2.2. Misión TurMec.....	22
2.3. Visión TurMec	22

Capítulo 3	23
3. Marco Teórico.....	24
3.1. Alrededor de la mejora continua	24
3.2. Alrededor de la gestión del riesgo.....	26
3.3. Alrededor del mantenimiento	29
3.3.1. Mantenimiento a la falla	29
3.3.2. Mantenimiento preventivo.....	30
3.3.3. Mantenimiento correctivo.....	31
3.3.4. Prevención de mantenimiento.....	31
3.4. Alrededor de la confiabilidad y la distribución Weibull.....	32
3.5. Alrededor del proceso cervecero.....	33
3.6. Alrededor de los equipos de servicios	35
3.6.1. Generación de frío	35
3.6.2. Generación de vapor.....	36
3.6.3. Captación y tratamiento de CO ₂	37
Capítulo 4	38
4. Análisis de mejora.....	39
4.1. Diagnóstico de planta	39
4.1.1. Sobre la organización	40
4.1.2. Sobre los estándares	43
4.1.3. Estudio de criticidad.....	44
4.1.4. Estudio de mantenimiento	45
4.2. Métricas.....	46
4.3. Análisis.....	52
4.4. Propuesta de mejora.....	59
Capítulo 5	64
5. Conclusiones	65
Anexo	A

A.	Figuras y tablas	B
	Figuras.....	B
	Tablas	D
B.	Fórmulas	P
	Confiabilidad	P
	Deducción de la regresión lineal	P
	Rango de mediana	Q
	Prueba de bondad de ajuste Kolmogórov-Smirnov	Q
	Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling.....	R
	Referencias	T

Índice de figuras

<i>Figura 1-1: Plan de trabajo para elaboración de propuesta de mejora en estrategia de mantenimiento.</i>	17
<i>Figura 3-1: Diagrama cíclico del método de mejora continua, DMAIC.</i>	25
<i>Figura 3-2: Modelo del propósito para la integración de la gestión del riesgo.</i>	27
<i>Figura 3-3: Esquema general del proceso de implementación de gestión del riesgo.</i>	29
<i>Figura 3-4: Diagrama del proceso cervecero.</i>	34
<i>Figura 3-5: Compresor de amoniaco Mayekawa.</i>	36
<i>Figura 3-6: Caldera de vapor pirotubular Loos.</i>	36
<i>Figura 3-7: Compresor de CO₂ NEA.</i>	37
<i>Figura 4-1: Análisis FODA del proyecto y la organización.</i>	39
<i>Figura 4-2: Estructura de la organización del área de Elaboración y Servicios.</i> .40	
<i>Figura 4-3: Estructura de la organización de Servicios.</i>	41
<i>Figura 4-4:Diagrama SIPOC del sector de Servicios.</i>	42
<i>Figura 4-5: Definición de impacto y peso ponderado de los criterios para construir la matriz de criticidad.</i>	44
<i>Figura 4-7: Árbol de métricas para el cumplimiento del objetivo principal del trabajo de mejora.</i>	47
<i>Figura 4-8: Histograma característico (azul) por criticidad de equipos en planta de Servicios, junto con la curva de ocupación porcentual (naranja) [Inicial].</i>	49

Figura 4-9: Histograma característico (azul) por criticidad de equipos en planta de Servicios, junto con la curva de ocupación porcentual (naranja) [Final].	50
Figura 4-6: Cronograma de tiempos de detención por cada evento registrado en el activo crítico en su bitácora de fallos para el periodo 2019.	52
Figura 4-10: Diagrama Jack-Knife de los eventos de falla expresados en escala logarítmica, mostrando los límites del número de fallas y horas de MTTR delimitando las regiones de clasificación de eventos.	55
Figura 4-11: Trazado de la recta de regresión con $\delta = 0$.	57
Figura 4-12: Trazado de la recta de regresión con $\delta = 29,9$ [hr].	58
Figura A-1: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para falta de comunicación efectiva.	B
Figura A-2: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para poca claridad de roles.	B
Figura A-3: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para trabajos mal realizados.	C
Figura A-4: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para presupuesto de mantenimiento.	C

Índice de tablas

Tabla 3-1: Definición de los distintos tipos de desperdicios operacionales.	26
Tabla 3-2: Factores externos e internos a considerar para el diseño de gestión del riesgo.	28
Tabla 3-3: Relación entre los servicios facilitadores de producción y miniplanta que los suministra.	35
Tabla 4-1: Clasificación de criticidad de equipos.	45
Tabla 4-3: Identificación de los desperdicios (mudas) del área de servicios.	46
Tabla 4-2: Tasa de ocupación de equipos críticos del área de servicios [Inicial].	48
Tabla 4-4: Selección del activo con mayor índice de criticidad entre aquellos de clasificación A.	50
Tabla 4-6: Parámetros de distribución Weibull derivados del estudio de regresión lineal.	58
Tabla 4-7: Factores financieros a considerar para la evaluación de factibilidad económica del cambio de estrategia de mantenimiento.	60
Tabla 4-8: Factores de tiempos de mantenimiento a considerar para la evaluación de factibilidad económica del cambio de estrategia de mantenimiento.	60

Tabla 4-9: Análisis financiero de la estrategia de mantenimiento preventivo cíclico.	61
Tabla 4-10: Contraste de presupuestos entre la estrategia de mantenimiento actuales y la propuesta.	61
Tabla 4-11: Contraste de confiabilidades evaluadas mediante tiempo medio entre fallas para la situación actual y la nueva propuesta de mantenimiento. (*) Valor de MTBF estimado del promedio por semana.	62
Tabla A-1: Desglose de equipos clasificados por criticidad [Inicial].	D
Tabla A-2: Desglose de equipos clasificados por criticidad [Final].	E
Tabla A-3: Bitácora de fallos del equipo crítico con los tiempos de detención asociados para al año 2019.	F
Tabla A-5: Resultados de las pruebas de bondad de Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling. Obtención de (*) y (**) detallada en el Anexo B.	G
Tabla A-4: Datos de regresión lineal para estimación de parámetros de Weibull.	H
Tabla A-5: Cuadro de descripción de cargo para el Coordinador de Servicios.	I
Tabla A-6: Cuadro de descripción de cargo para el Jefe de Servicios.	J
Tabla A-7: Cuadro de descripción de cargo para el Jefe de Efluentes.	K
Tabla A-8: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de Aguas.	L
Tabla A-9: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de CO ₂	M
Tabla A-10: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de Vapor.	N
Tabla A-11: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de NH ₃	O

Índice de ecuaciones

Ecuación 3-1: Función de densidad de distribución de Weibull.	32
Ecuación 3-2: Función de confiabilidad de la distribución Weibull.	32
Ecuación 4-1: Cálculo del índice de criticidad de un equipo, donde I es el impacto del criterio y P , su peso ponderado.	44
Ecuación 4-2: Estimación de tiempo medio entre fallas semanal.	56
Ecuación 4-3: Función de confiabilidad del activo crítico.	58
Ecuación B-1: Regresión lineal de la función de distribución acumulativa.	Q
Ecuación B-2: Definición del parámetro de escala mediante regresión lineal.	Q
Ecuación B-3: Rango de mediana para nivel de confianza $1 - \alpha$ (con $\alpha = 0,5$) y de parámetros; i (orden de falla), n (número de datos), F (distribución de Fischer).	Q

Ecuación B-4: Estadístico de contraste para prueba de bondad Kolmogórov-Smirnov donde F_n es el valor de la función de densidad del estimador observado de la distribución y F_0 , el valor aceptando H_0 R

Ecuación B-5: Valor crítico para comparación donde C_α viene entregado por tabla y $k(n)$ para una distribución Weibull se obtiene como n R

Ecuación B-6: Estadístico de contraste para la prueba de bondad de ajuste Anderson Darling, para un orden de N datos y F_0 el valor de la función de densidad de la distribución asumiendo H_0 R

Introducción

TurMec es la empresa productora de cerveza más grande del mundo, operando desde 1993 como Cervecería TMC en la ciudad de Santiago produce más de un millón de hectólitros de cerveza al año y es la fuente de trabajo de más de 500 trabajadores [1]. La Cervecería TMC funciona como una sucursal de producción de esta multinacional, que desde hace unos años comenzó con su evolución en gestión y administración de planta, adoptando el modelo de gestión denominado VPO (Voyager Plant Optimization), que busca lograr excelencia internacional para la forma en la que se gestionan los distintos aspectos industriales de la planta. Uno de estos pilares fundamentales es el Mantenimiento, que busca lograr altos niveles de autonomía por parte de sus operadores, pilar fundamental para el TPM (Total Productive Maintenance).

Descripción del problema

El área de producción cuenta con distintas etapas que describen el proceso de producción de cerveza, estas etapas se pueden caracterizar en tres áreas como; Servicios, Elaboración, y Envasado. Si bien Elaboración y Servicios están actualmente consolidados como una sola área (desde el punto de vista administrativo), la realidad es que Servicios podría funcionar como un área independiente. Su función es la de facilitar los servicios para la producción en todas las demás áreas directamente productivas, junto con el suministro de estos para toda la planta. Al hablar de servicios nos referimos a la energía y fluidos demandados por la planta para funcionar, los cuales toman la forma de; aire comprimido, tratamiento y suministro de aguas (para uso directo e indirecto en la producción), vapor de agua, tratamiento de efluentes, suministro y captación de CO₂, y suministro de frío.

Recientemente, toda la planta se vio sometida a grandes cambios en su infraestructura, contemplando una ampliación que tiene como fin aumentar la capacidad de producción y así poder satisfacer la demanda del mercado característico de una empresa de la talla multinacional. Este cambio ha afectado de forma secuencial a cada una de las áreas de producción, y Servicios no es la excepción. Este cambio contempla la incorporación de nuevos equipos para cada una de las miniplantas que conforma el área, y con estos nuevos cambios en su estructura se genera una urgencia por mantener y mejorar desde ya un estándar de mantenimiento que cumpla con las exigencias de la empresa.

En términos de gestión del mantenimiento, ya se habla de lograr una autonomía por parte de los operadores en las diversas tareas de mantenimiento. Este mantenimiento autónomo (ATO) ya está tomando vuelo en las áreas de envasado y elaboración, donde los mismos operadores se hacen dueños de sus equipos y procesos, y son capaces de gestionar en su medida las tareas de mantenimiento. Este no es el caso para Servicios, si bien sus operadores conforman un equipo capacitado y con fuertes aptitudes de autonomía, hace falta una formalización y estandarización de sus operaciones de mantenimiento. Esta falta de formalización de tareas de mantenimiento se puede observar desde la falta de documentos que capaciten en chequeos rutinarios o de seguridad, hasta la falta de un análisis formal de políticas de mantenimiento centrado en confiabilidad y reevaluación de los criterios de criticidad operativa de los equipos.

Es por lo anteriormente expuesto que el propósito de este trabajo será el de brindar un antecedente de análisis que presente una mejoría en la estrategia de mantenimiento, seguridad, y autonomía para la planta de Servicios.

Como punto importante sobre el análisis a realizar será una primera diferenciación entre *estrategias* y *tácticas* de mantenimiento. Estos son conceptos que pueden sonar similares, mas difieren en el enfoque práctico que representan. La diferencia principal radica en que una estrategia de mantenimiento busca definir y organizar las distintas acciones que se deben realizar para llevar a cabo una actividad o intervención de mantenimiento. Por otra parte, las tácticas de mantenimiento son aquellas acciones concretas que se van a implementar para cumplir con los objetivos de la estrategia. En este trabajo se busca realizar un análisis las tácticas (como lo es la organización de equipos y personal) y de la estrategia de mantenimiento, derivado de un análisis de competencias organizacionales y de políticas de mantenimiento con enfoque en costos y confiabilidad.

Cabe esclarecer, para todos efectos y propósitos académicos, que el presente análisis de mejora de mantenimiento será efectuado sobre una *empresa ficticia*. Este estudio propone un antecedente de análisis para empresas con sistemas y condiciones de falla similares a las que se exponen a partir de una simulación de eventos de falla.

Objetivos

Conforme al desarrollo inicial del trabajo, se procede a declarar el objetivo general y los objetivos específicos.

Objetivo general

Generar una propuesta de mejora en la estrategia de mantenimiento para equipos críticos del área de servicios industriales en planta de producción de cerveza.

Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento de los equipos que conforman al área de servicios industriales.
- Evaluar los criterios actuales de criticidad de equipos.
- Realizar una simulación de funciones de falla y condiciones operacionales.
- Identificar las actuales políticas de mantenimiento.
- Realizar análisis de mejora para la actual estrategia de mantenimiento
- Determinar provecho financiero de la propuesta de mejora.

Capítulo 1

1. Metodología de trabajo

A continuación, se definirá el plan de trabajo para realizar este proyecto y lograr así los objetivos planteados.

Se comenzará con un levantamiento de información mediante el estudio de marco teórico relativo a los conceptos de mantenimiento y la gestión del riesgo, estudiando así los tipos y técnicas de mantenimiento, junto con las herramientas clave para realizar gestión del riesgo. También será necesario relevar los equipos existentes en el área productiva para así poder evaluar sus actuales políticas de mantenimiento y sus criterios para ser catalogados como de alta criticidad. Este diagnóstico permitirá dar inicio al proceso de mejora continua que resultará en una propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento de los equipos críticos del área de servicios.

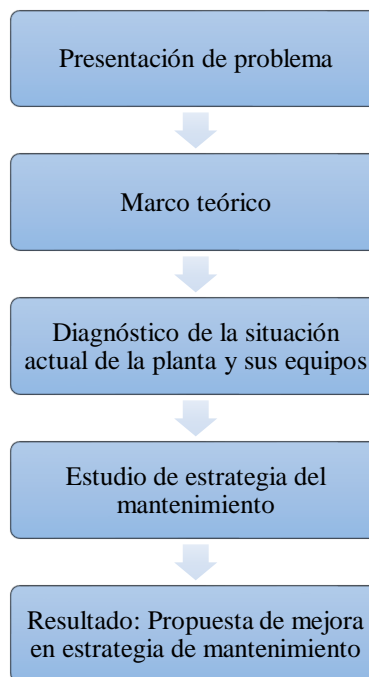


Figura 1-1: Plan de trabajo para elaboración de propuesta de mejora en estrategia de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

1.1. Presentación del problema

Siguiendo el principio del método ingenieril, lo primero es identificar con claridad el problema, definiendo cual es la principal dolencia que se presenta en planta y cuáles son los indicadores que permiten cuantificar el problema actual. Definir estos indicadores es de suma importancia, ya que estos permitirán más adelante medir y controlar el impacto y avance del plan de mejora.

1.2. Marco teórico

Una vez definido el problema, se precisa de hacer un levantamiento de los equipos que conforman el área de interés, para poder realizar un completo análisis de criticidad de estos. En esta sección también se establecen las directrices de las principales estrategias y tácticas de mantenimiento presentes en la industria en general, lo que servirá como base de comparación para las estrategias que actualmente se están implementando en la planta y cuáles podrían ser sus mejores opciones de mejora.

Para el cumplimiento de los objetivos, también es importante identificar la metodología presente en los ciclos de mejoramiento continuo. Así, es posible establecer las bases del plan de trabajo que se desea realizar.

Dentro de lo que será el análisis de las condiciones de funcionamiento y estado de fallas del equipo definido como crítico se realizará un repaso de la matemática utilizada para conceptualizar el modelo de la simulación.

1.3. Diagnóstico de la situación actual de la planta y sus equipos

Dentro del análisis resulta necesario conocer los actuales planes y estrategias de mantenimiento que se llevan a cabo en los equipos. También es importante conocer el contexto operacional bajo el cual funcionan dichos equipos y si su historial de falla (en caso de existir) pueda dar luces sobre si se está llevando a cabo la correcta estrategia de mantenimiento (e.g. si este es correctivo cuando debiese ser preventivo).

En este tipo de diagnósticos también es importante conocer los actuales criterios que se tienen para evaluar la criticidad de los equipos, ya sea por normativa interna o basándose en un criterio definido por norma internacional. Esta información resultará útil para dar prioridad a aquellos equipos que sean de mayor índice crítico.

1.4. Estudio de estrategia de mantenimiento

Siguiendo con los lineamientos de la mejora continua, se debe realizar un plan de trabajo orientado en un *Ciclo de Mejora*, en el cual se definirá el contexto tanto interno como externo del o los equipos, y se medirán los indicadores correspondientes y de interés para el proyecto.

En esta etapa del trabajo, se realizará una simulación de las condiciones de funcionamiento y falla de aquel equipo que se haya determinado como crítico. Esta simulación utilizará un modelo definido mediante algoritmos que determinarán los tiempos de falla que podría experimentar el equipo en cuestión, para así tener una medida de la confiabilidad de éste en base al funcionamiento esperado. El fin de esta simulación será la de presentar métricas cuantificables para el análisis de mejora.

El estudio de mejoramiento explorará dos conceptos clave a lo largo del *Ciclo de Mejora*; la criticidad de equipos, y el mantenimiento de estos, de modo que la lectura de estos conceptos se dará en distintos pasos del *Ciclo de Mejora*, para así ir profundizando sus análisis respectivos en el *Ciclo de Mejora*. Es decir, primero se abordarán los conceptos de criticidad y mantenimiento desde un punto de vista identificatorio (D), como métricas (M), para luego utilizar herramientas de análisis (A) según les corresponda y así poder dar con sus correspondientes propuestas de mejora (I).

1.5. Resultados

Como resultado se deberá tener, en cumplimiento con los objetivos, una propuesta de mejora para la actual estrategia de mantenimiento, que contemple incorporar nuevos enfoques de mantenimiento, que deberá presentar una mejora en uno o más de los indicadores anteriormente definidos, junto con un análisis de prefactibilidad económica que apoye a la decisión de implementación.

1.6. Conclusiones

Se deberá concluir sobre los resultados obtenidos, comentar sobre las herramientas utilizadas para el análisis y justificar su uso. También se deberán plantear recomendaciones para modificar la forma de abordar un proyecto similar y proponer temas de investigación que puedan desprenderse del presente trabajo.

Capítulo 2

2. Antecedentes

A fin de introducir el contexto operacional, a continuación se presentan los antecedentes generales de la empresa, junto con su misión y visión.

2.1. La empresa

La empresa donde se desarrolló este proyecto de mejoramiento fue Cervecería TurMec Chile S.A., una filial de la multinacional TurMec, empresa que actualmente lidera el mercado de cervezas en el mundo y actualmente con presencia en más de 50 países, incluyendo a Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay, Uruguay y Chile en su rama sudamericana.

TurMec realiza sus operaciones en Chile desde 1993 participando en el mercado con la elaboración de marcas nacionales a internacionales. Es como consecuencia de su importante participación en el mercado global que la organización ha adoptado un enfoque de desarrollo empresarial que busca de forma constante la excelencia mediante la innovación y la sustentabilidad de su gestión de procesos. Este enfoque se ve reflejado en la cultura organizacional que busca hacer responsable a todos sus participantes y hacerlos dueños de sus procesos, reflejado en su visión como compañía.

Como toda planta de producción, la cervecería cuenta con diversas zonas de producción las cuales cubren desde la recepción y manejo de materias primas de la cerveza, hasta el transporte y distribución de envasados. Una de las áreas más críticas resulta ser aquella que trabaja de forma indirecta con el producto, la denominada área de Servicios.

En Servicios se tratan todos los equipos y procesos que no están directamente involucrados con la elaboración de cerveza, sin embargo, sus operadores sí cuentan con el mismo nivel de compromiso y entrega por cumplir el sueño de la empresa que aquellas áreas que representan la producción directa. Su criticidad va de la mano con el hecho de que no representa una etapa específica en la línea de producción cervecera, sino que se puede encontrar en diversas etapas de esta. Tanto en la generación de frío para etapas de fermentación, o en la captación e inyección de dióxido de carbono para almacenamiento y envasado. Servicios funciona como un facilitador de toda la producción de cerveza.

Es por lo anterior que resulta crucial poder estar constantemente evaluando y mejorando la gestión y el mantenimiento de los equipos que componen esta área para asegurar el buen cumplimiento de los compromisos establecidos para con el sueño de la empresa.

2.2. Misión TurMec

“Mejorar el mundo creando unidad.”

2.3. Visión TurMec

“Somos una compañía de agentes de cambio, buscamos la excelencia en nuestros productos y procesos con honestidad, transparencia, y garantía de resultados haciéndonos dueños y dueñas de nuestros compromisos.”

Capítulo 3

3. Marco Teórico

A continuación, se describen las herramientas generales de análisis que se utilizarán en el trabajo relativo a la mejora continua. Se expone sobre la normativa de gestión del riesgo, se detallan las clasificaciones de tipos de mantenimiento, y se detalla el álgebra de confiabilidad utilizada como métrica dentro del trabajo y su relación con la distribución de probabilidad de Weibull.

3.1. Alrededor de la mejora continua

El proceso de mejoramiento continuo se puede entender como una filosofía de trabajo que busca lograr la superación sistemática de las problemáticas que puedan presentarse en diversos procesos. En la industria puede verse como una caja de herramientas con la cual podemos contar para realizar mejoras en los procesos tanto productivos como administrativos y gestores de información.

Desde un punto de vista de aplicación sistemática existe un concepto conocido como el *Ciclo de Mejora*, el cual es muy similar al Ciclo de Calidad (de Deming) y sus pasos de PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar). Sin embargo, el *Ciclo de Mejora* desglosa y elabora un poco más las fases del ciclo de Deming [2].

En el transcurso del proyecto se irán explorando estas etapas del *Ciclo de Mejora*, realizando un estudio y aplicación de las diferentes herramientas diseñadas para el preciso enfoque que representa cada una de estas etapas.

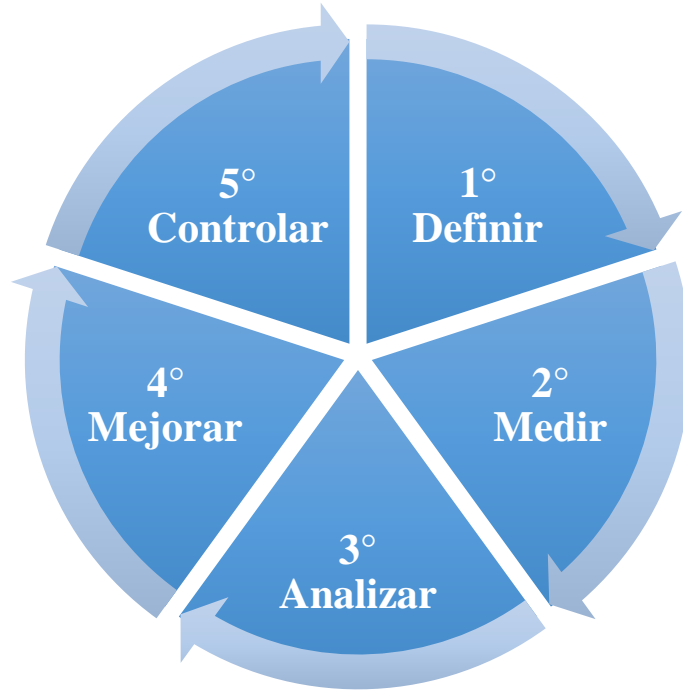


Figura 3-1: Diagrama cíclico del método de mejora continua, DMAIC.

Fuente: Gutiérrez H. et al. (2009) [3].

En los distintos pasos de este *Ciclo de Mejora* se pueden presentar diversas herramientas, las cuáles pueden cumplir diversas funciones de medición, análisis y control. Una que vale mencionar para este trabajo es la de clasificación de desperdicios operacionales, conocidos también como *mudas* (de su traducción japonesa).

La literatura de mejoramiento establece 8 clasificaciones de desperdicios que pueden identificarse dentro de un proceso [4].

Tabla 3-1: Definición de los distintos tipos de desperdicios operacionales.

Fuente: Salgueiro et al. [4].

Tipo de desperdicio	Descripción
Creatividad/Capacidad sin aprovechar	Pérdida de oportunidades debido a inseguridades, infravaloraciones de los trabajadores, o capacidad productiva no aprovechada.
Defectos	Pérdidas ligadas a reprocesos o trabajos que deben volver a realizarse por resultados fuera de los rangos aceptables.
Inventario	Excesos de materias primas, producto procesado, o producto terminado a la espera de ser utilizados.
Sobreproducción	Excesos de oferta por sobre las demandas, tanto internas como externas.
Tiempo de espera	Pérdidas ligadas al bajo desempeño de ciertos sectores (ya sea retrasos, detenciones, desabastecimiento, etc....).
Exceso de movimiento	Movimientos innecesarios de equipos o personal durante uno o más trabajos.
Transporte	Excesos de movimientos de trabajos, materiales o documentación ligada al proceso.
Procesos innecesarios	Tareas o trabajos que no representan un valor agregado ni para el proceso ni para el cliente.

Será en base a estas definiciones que se podrán realizar las observaciones de las dolencias y desperdicios que puedan identificarse, tanto a nivel organizacional como operacional, dentro de la planta de Servicios.

3.2. Alrededor de la gestión del riesgo

La gestión del riesgo resulta ser un aspecto de suma importancia cuando se desea realizar la implementación de cualquier proyecto de mantenimiento en equipos de procesos productivos. Esta gestión busca que tanto el entendimiento del riesgo y la información respectiva esté clarificada y bien definida para los altos cargos, y que estos se encarguen de realizar una correcta bajada de información para los niveles operacionales.

El propósito de la gestión del riesgo es la de integrarse en las actividades y funciones significativas a lo largo de la jerarquía de los organismos industriales [5]. Esto quiere decir que la gestión debe ser apropiadamente delegada

entendiendo la estructura organizacional y el contexto interno bajo el cual se desarrolle una planta de producción.



Figura 3-2: Modelo del propósito para la integración de la gestión del riesgo.

Fuente: ISO 31.000 [5].

Cuando se habla del liderazgo en la gestión del riesgo, se trata de la delegación de autoridad y responsabilidad en las distintas actividades que involucran la gestión del riesgo. Esto incluye mas no se limita a la comunicación, promulgación y promoción de reconocimiento, cuantificación, y monitoreos de riesgo.

La integración de la gestión del riesgo se entiende como la verticalización del compromiso, todos en la organización tienen responsabilidad de gestionar el riesgo que se presente dentro de la planta. La norma ISO 31.000 (2018) señala que el proceso de integración ha de ser dinámico e iterativo, deberá ser parte del propósito organizacional y, por tanto, deberá ajustarse a las necesidades y a la cultura organizacional donde sea implementado.

El diseño de esta gestión debe ser considerado en plan conforme al contexto tanto interno como externo a la planta, adaptándose a aspectos claves tales como sus políticas internas, sus estándares, o relaciones con los stakeholders.

Tabla 3-2: Factores externos e internos a considerar para el diseño de gestión del riesgo.

Fuente: ISO 31.000 [5].

Contexto Externo	Contexto Interno
Tendencias que afecten a los objetivos de la empresa Compromisos contractuales Compromiso con stakeholders (ext.) Complejidad de la red de suministros Contexto cultural, legal, regulatorio	Misión – Visión Estándares Roles y responsabilidades Compromiso con stakeholders (int.) Estrategia, objetivos Cultura organizacional Capacidad Datos y flujo de información

Se debe mostrar compromiso de forma constante por parte de los puestos gerenciales hacia la gestión del riesgo. La norma ISO 31.000 (2018) establece distintos tipos de enfoques para realizar una correcta gestión por parte de los cargos con mayor responsabilidad. En síntesis, estos deben generar compromiso mediante liderazgo y asignación de roles, y responsabilidades a lo largo de la estructura; además de establecer canales de comunicación y conductos regulares para facilitar el flujo de información a todas las áreas.

La implementación de la gestión del riesgo se debe lograr mediante una ardua planificación que tome en cuenta los recursos disponibles y el tiempo. Se deben identificar los cuadros de roles y establecer las jurisdicciones según corresponda. Luego de la implementación, la organización deberá someter al sistema de gestión a evaluación para así poder identificar sus oportunidades de mejora [5].

El proceso de gestión del riesgo consiste en una serie de pasos similar al de la gestión de mejora continua. Se debe realizar una asignación e identificación de los riesgos presentes que puedan impedir el cumplimiento de los objetivos de la organización. Una vez identificados se debe realizar un análisis para comprender la naturaleza de los riesgos (fuentes, consecuencias, probabilidad de ocurrencia). Luego, viene una evaluación que ayudará en la toma de decisiones sobre qué hacer con los riesgos, si se decide tratar o corregir.

El proceso de gestión del riesgo debe ser retroalimentado mediante constante monitoreo y revisión, el cual deberá ser debidamente registrado y comunicado. Es importante llevar el registro, ya que servirá como referencia a futuro para posibles nuevos proyectos de gestión del riesgo.



Figura 3-3: Esquema general del proceso de implementación de gestión del riesgo.

Fuente: ISO 31.000 [5].

3.3. Alrededor del mantenimiento

Cuando se habla de políticas de mantenimiento se tiene que tomar en cuenta el enfoque que se desea dar, los distintos factores del contexto operacional, y la criticidad y riesgos operacionales de aquellos sistemas, equipos, o máquinas a los cuales se les desea aplicar dichas políticas. De la literatura del mantenimiento reconocen los siguientes tipos de políticas:

3.3.1. Mantenimiento a la falla

Para este tipo de mantenimientos no se necesitan mayores herramientas de predicción o medición de sintomatología, simplemente se espera a que el equipo falle cuando tenga que fallar, entonces se repara mientras se pone en marcha un respaldo o simplemente se detiene la producción (la cual, en el contexto operacional, es de menor prioridad). En menor o mayor grado, existen situaciones en las cuales los costos de reparación y/o intervención son tan marginales en comparación a otro tipo de maniobras que en dichas situaciones se prefiere esperar a que el equipo falle. Este tipo de mantenimiento pretende que el equipo trabaje y falle hasta no poder seguir operando. Es la forma más básica de mantenimiento, ya que se enfoca solo en la constante corrección de mayores desviaciones en la medida que van ocurriendo.

Este tipo de mantenimiento debiese reservarse a equipos que cuenten con un sistema de relevo para evitar paradas en la producción y, por ende, reservarlo para aquellos equipos que no sean críticos o de poca importancia para la producción [6].

3.3.2. Mantenimiento preventivo

Existen instancias en las cuales el mantenimiento correctivo no resulta viable, ya que los costos tanto de reparación y repuestos, como la mano de obra de emergencia, y junto con las horas de inoperancia, resultan ser muy elevados para ser asumidos de forma sistemática por cualquier empresa. Es por esto por lo que se prefiere optar por políticas de mantenimiento que puedan prevenir la ocurrencia de las fallas, mediante estudios de comportamiento y vida útil de los equipos, junto con el cruce de costos relativos al mantenimiento, debido a que tampoco resulta conveniente desde un punto de vista financiero realizar intervenciones con más frecuencia de la necesaria. Dado que uno nunca puede planificar una falla aleatoria (decimos “aleatorio” cuando el comportamiento resulta difícil de predecir o cuando no se cuenta con la suficiente información para poder predecir el resultado de una acción o proceso).

Este tipo de mantenimiento busca prolongar la vida útil de los equipos y así postergar la instancia en la cual se produce la falla. A diferencia del mantenimiento a la falla, este se suele aplicar en aquellos equipos cuyo valor productivo sea de consideración en relación con la producción total [6].

Se pueden reconocer dos tipos de mantenimiento preventivo;

- *Mantenimiento Predictivo*

Es importante, desde un punto de vista operacional, que los involucrados en el buen funcionamiento de un equipo (crítico o no) conozcan a fondo el comportamiento de las máquinas, similar a como un conductor conoce a su propio automóvil; conoce las vibraciones, los ruidos, la calibración de los frenos, la sujeción de los neumáticos. Este tacto que se tiene de un equipo permite distinguir ciertos comportamientos (o síntomas) que pueden ser indicadores de una posible falla.

El análisis de mantenimiento predictivo se basa en un estudio del historial de fallas, inspecciones y aplicación de mantenimientos justo antes de que el equipo fallara en ocasiones pasadas. El enfoque de mantenimiento está basado en las condiciones del equipo [6].

- *Mantenimiento Periódico*

Dependiendo de las condiciones bajo las cuales trabaja un equipo, suele ser recomendable realizar lo que se conoce como mantenimiento periódico. Como el nombre indica, se establece un periodo de tiempo fijo para realizar intervenciones al equipo, máquina o sistema. Este tipo de análisis toma en cuenta factores como el MTBF, MTTR, y los costos de realizar mantenimiento, tanto por falla (correctivos), como aquellos que se realizan de forma preventiva, incluyendo las probabilidades de ambos escenarios y otros costos como el de inoperancia (dinero que se pierde por no estar produciendo).

Este es un mantenimiento basado en el tiempo y consiste en darle periodicidad a la inspección, limpieza y el posible reemplazo de piezas con el fin de prever fallas inesperadas [6].

3.3.3. Mantenimiento correctivo

Similar al primer tipo de mantenimiento, este posee un enfoque reactivo. Sin embargo, la falla no es de nivel catastrófico, sino que son pequeños inconvenientes que, en lugar de detener en su totalidad la producción, la entorpecen disminuyendo la fluidez del proceso.

En algunos casos, dado que resulta imposible la predicción o prevención de fallas, la única opción disponible es realizar mantenimiento correctivo. Su ventaja radica en que permite generar un historial de fallas tanto del equipo como de sus componentes, y permite visibilizar oportunidades de mejora para iniciar el camino a implementar mantenimientos preventivos [6].

3.3.4. Prevención de mantenimiento

La mejor política de mantenimiento no necesariamente será aquella que realice más intervenciones a un equipo; hoy en día resulta conveniente minimizar estas operaciones, dejando como resultantes las actividades que puedan generar el mayor impacto positivo por tarea de mantenimiento. En otras palabras, más vale diseñar desde un principio un sistema para ser *low maintenance* [de bajo mantenimiento], que aumentar las actividades de mantenimiento, cumpliendo el mismo objetivo de tenerlo dentro de condiciones funcionales.

Con esta política se involucra la ingeniería de diseño para la maquinaria, enfocada en la prevención de necesidad de mantenimiento y/o la facilidad del operador para tener acceso al equipo y sus componentes para así facilitar los procesos del mantenimiento [6].

3.4. Alrededor de la confiabilidad y la distribución Weibull

En estadística, se define a la distribución Weibull como una distribución continua de probabilidad que opera con 3 parámetros; de forma (β), de escala (θ), y de localización (δ). Estos parámetros describen el sesgo de la distribución, que tan aguda o plana es, y el punto de inicio de la distribución, respectivamente [7].

Con lo anterior, se define la función de densidad de la distribución como:

$$f(t) = \frac{\beta(t - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right]$$

Ecuación 3-1: Función de densidad de distribución de Weibull.

Fuente: Dodson et al. [7].

Esta función de densidad permite definir la confiabilidad de un equipo o sistema como función del tiempo y de los parámetros anteriormente definidos (β , θ , y δ) como:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}$$

Ecuación 3-2: Función de confiabilidad de la distribución Weibull.

Fuente: Dodson et al. [7].

Esta confiabilidad se interpreta como la probabilidad de que el equipo o sistema cumpla con su función establecida; en el presente caso, que el equipo o sistema cumpla con una carga de función medida en horas de funcionamiento.

Para este estudio se decide optar por el modelo Weibull, ya que los datos de funcionamiento del equipo ubicado en la planta permiten definir los parámetros mediante regresión lineal, facilitando los cálculos de estos. Como se deduce en el **Anexo B**, se podrá llegar a una ecuación lineal del tipo:

$$y = \beta \cdot x + b$$

Donde la pendiente de la recta podrá dar de forma directa el parámetro de forma, mientras que el de escala quedará definido como función del intercepto y de β [7].

Una vez definidos los parámetros que definen la función de confiabilidad del equipo, se podrá contar con una métrica cuantificable para evaluar la situación actual del sistema, y posibles opciones para abordar un plan de mejora en la estrategia de mantenimiento.

3.5. Alrededor del proceso cervecero

Conforme a lo indicado por [8] y [9], para lograr un proceso de RCM es necesario tener claridad del contexto operativo alrededor del cual trabajan aquellos equipos que se les desee realizar el estudio pertinente. Es por ello por lo que se detalla a continuación el entorno operacional de la planta de servicios y sus equipos.

El proceso de elaboración de la cerveza se inicia con la recepción de los granos de cebada. Estos pasan por una etapa de molienda, dicha etapa puede ser seca o húmeda, y cuyo objetivo es aumentar la superficie de contacto por volumen para facilitar la acción enzimática durante la siguiente etapa.

En la maceración se mezcla la malta de cebada (y ocasionalmente cereales adjuntos como trigo o arroz) con agua a altas temperaturas; donde las enzimas agregadas convierten el almidón de esta mezcla en azúcares simples y las proteínas en aminoácidos. La mezcla se filtra separando los subproductos sólidos del líquido (ahora llamado mosto) para luego pasar por un hervidor que esteriliza el mosto. En esta etapa también se agrega el lúpulo que proporciona los aromas herbales a la cerveza, junto con adicionarle amargor.

Después de retirar los últimos sólidos por sedimentación, la mezcla de mosto pasa a la fermentación. Aquí se le adiciona la levadura, microorganismo que se encarga de transformar los azúcares de almidón en alcohol y gas carbónico. Dependiendo del tipo de cerveza este proceso puede ocurrir entre 7 y 13 °C, al igual que la filtración final que ocurre a bajas temperaturas. Finalmente, la cerveza pasa a unos tanques llamados “medidoras” para luego pasar a la fase de envasado.

Todo el proceso de elaboración anteriormente descrito cuenta con varias etapas y fenómenos orgánicos que de forma intrínseca dependen del buen funcionamiento del área de servicios.

La maceración funciona a base del cocimiento de los componentes que forman el mosto. Esta alza de temperatura se logra con la inyección de vapor de agua al sistema, el cual se obtiene de la **sala de calderas**.

La fermentación ocurre a temperaturas que se logran enfriando los tanques de fermentación TCC (Tanque de Cilindro-Cónico) mediante la aplicación de glicol enfriado a hasta -4°C, este enfriamiento se logra en el **sistema de generación de frío** de NH₃ (Amoniac). A su vez, la fermentación tiene como subproducto orgánico el gas carbónico CO₂ (dióxido de carbono), el cual debe ser captado y

tratado para aumentar su pureza y disponibilidad para otros procesos que mencionaremos más adelante. Todo eso se logra con la **planta de captación de CO₂**.

El gas carbónico tratado en Servicios es utilizado en varias instancias; en el almacenaje de cerveza terminada en medidoras es usado como un compuesto que desplaza el oxígeno, evitando que éste oxide (valga la redundancia) la cerveza, efecto que puede tener un efecto negativo en el facto sensorial del producto.

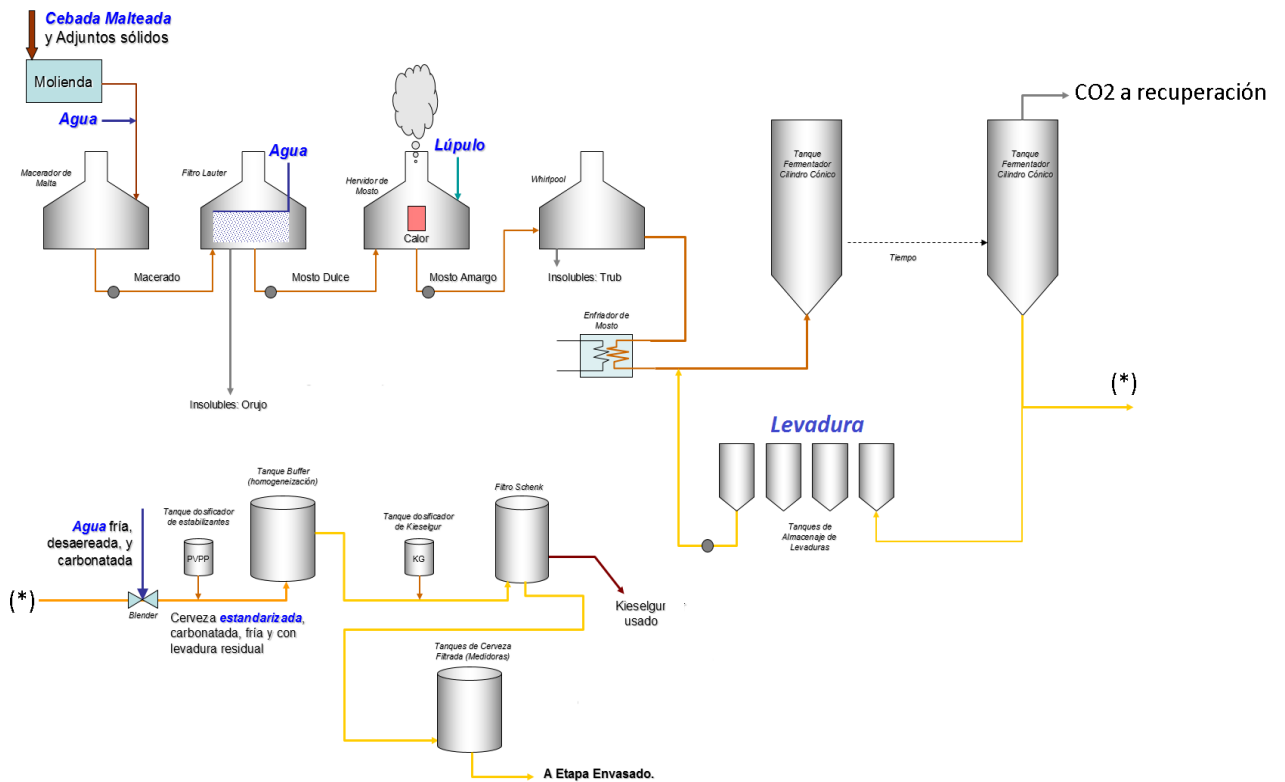


Figura 3-4: Diagrama del proceso cervecero.

Fuente: TurMec [1].

3.6. Alrededor de los equipos de servicios

Una vez establecido el contexto operacional, la gestión de fallas requiera de una clara definición del activo o sistema de interés para el estudio, según indica [9]. Esta definición incluye sus fronteras operacionales, sus funciones y modos de falla. A priori se presentan los principales equipos de la planta de servicios.

Como se revisó en la sección anterior, la producción de cerveza involucra varias etapas, las cuales requieren de diversos facilitadores para poder realizar el proceso como corresponde. Como ya se mencionó, para el estudio destacan tres sectores de importancia, más adelante se definirá mediante criterios de criticidad aquel sistema o equipo al cual se realizará un estudio más profundo de mantenimiento.

Tabla 3-3: Relación entre los servicios facilitadores de producción y miniplanta que los suministra.

Fuente: Elaboración propia.

Servicio Facilitador	Planta suministradora
Generación de Frío	Planta de NH ₃ (Amoniaco)
Generación de Vapor	Sala de Calderas
Captación y tratamiento de CO ₂	Planta de CO ₂ (Dióxido de Carbono)

3.6.1. Generación de frío

La generación de frío se logra mediante un ciclo termodinámico cerrado que utiliza como fluido de trabajo el amoniaco (NH₃). Este fluido, dada ciertas propiedades termodinámicas, es capaz de enfriar el líquido de refrigeración (glicol) a una temperatura de trabajo óptima para usarse en la etapa de fermentación mediante un sistema de intercambio de calor por placas.

En el ciclo de generación de frío, se destaca como equipo crítico (definido por el equipo de mantenimiento) al compresor de amoniaco.

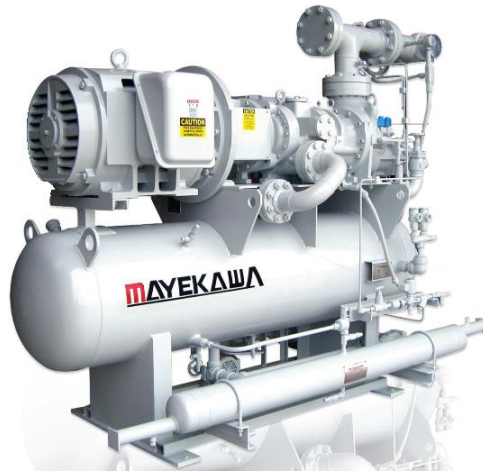


Figura 3-5: Compresor de amoníaco Mayekawa.

Fuente: Mycom [10].

3.6.2. Generación de vapor

La generación de vapor se logra mediante el calentamiento de aguas industriales, previamente tratadas, a través de calderas pirotubulares que se encargan de generar vapor sobrecalentado a 8,8 [bar] de presión. El ciclo de agua es cerrado, pero debido a eventuales pérdidas es que se le incorpora agua tratada de forma constante. Dada la demanda de vapor que exige la fábrica, es que se reconoce como equipo crítico del área a la caldera principal.



Figura 3-6: Caldera de vapor pirotubular Loos.

Fuente: Bosch [11].

3.6.3. Captación y tratamiento de CO₂

El proceso cervecero de forma natural genera cantidades importantes de dióxido de carbono debido al metabolismo de la levadura dentro de los tanques de fermentación. Sin embargo, este debe ser captado para evitar problemas medioambientales, además de ser usado posteriormente en procesos de carbonatación del agua, ingrediente que compone 90% de la cerveza. Es por esto por lo que el CO₂ que se capta de fermentación debe ser tratado por un sistema de limpieza, purificación, y secado para su eventual almacenamiento. De esta área es que se selecciona como equipo crítico el compresor de CO₂.

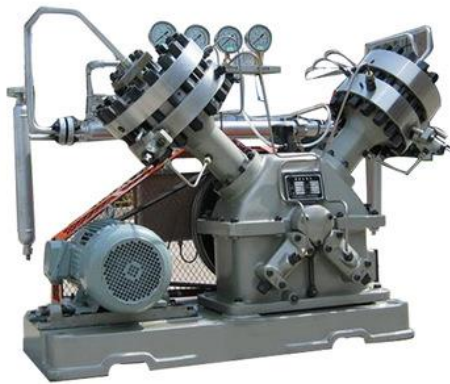


Figura 3-7: Compresor de CO₂ NEA.

Fuente: Dantechique [12].

Capítulo 4

4. Análisis de mejora

En este capítulo, se procede a realizar el análisis de mejora para la empresa y su estrategia de mantenimiento. En cada sección se hará uso de las distintas herramientas correspondientes a las distintas fases del ciclo DMAIC.

4.1. Diagnóstico de planta

Este proyecto de mejora involucra la participación transversal de los escalafones administrativos, no sólo a nivel operacional, sino que también se puede involucrar a los directivos directos del sector y puede tener valor para replicar en otras áreas de producción. De forma última, se busca que la organización adquiera compromiso para con la gestión de mantenimiento y riesgo, los cuales son factores fundamentales para la meta que se plantean como gestores del mantenimiento total.

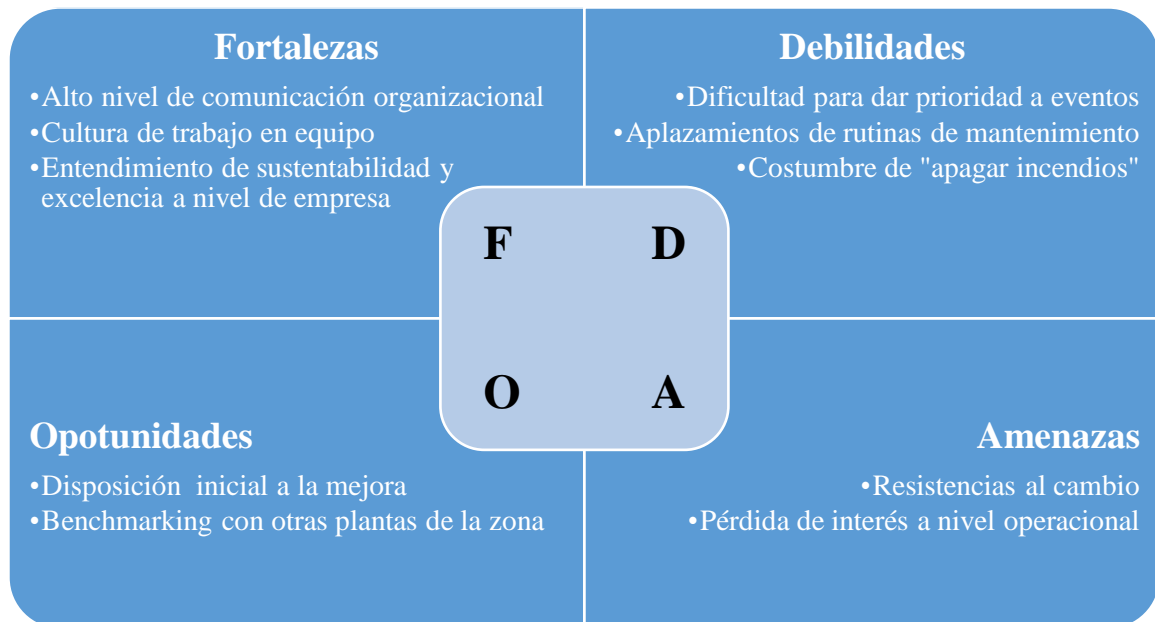


Figura 4-1: Análisis FODA del proyecto y la organización.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Sobre la organización

Como se mencionó con anterioridad, la planta de servicios industriales está al servicio de la producción de cerveza suministrando los distintos facilitadores para la producción. Cuenta con una administración que vela por la producción de la cerveza, mientras administra como una categoría paralela al área de servicios industriales.

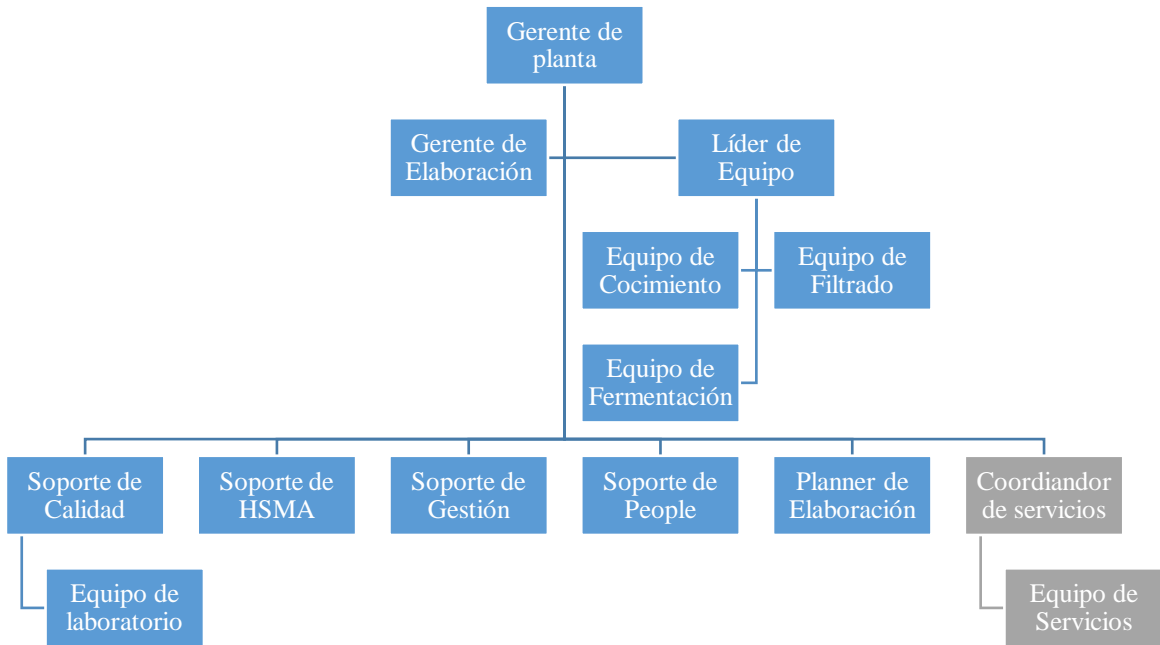


Figura 4-2: Estructura de la organización del área de Elaboración y Servicios.

Fuente: Elaboración propia.

La coordinación de servicios funciona bajo un comando que podría catalogarse como independiente, pero responde directamente a la gerencia de elaboración, por definición de la mesa directiva de la región (SAZ). El capital humano de la coordinación de servicios se encuentra dividido en dos zonas principales, el tratamiento de efluentes del proceso de producción y los servicios industriales generales, donde los operadores no intercambian funciones entre estas dos zonas. Sin embargo, dentro de cada una de estas divisiones los operadores se encuentran capacitados para realizar las diversas tareas de operación que exigen los equipos.

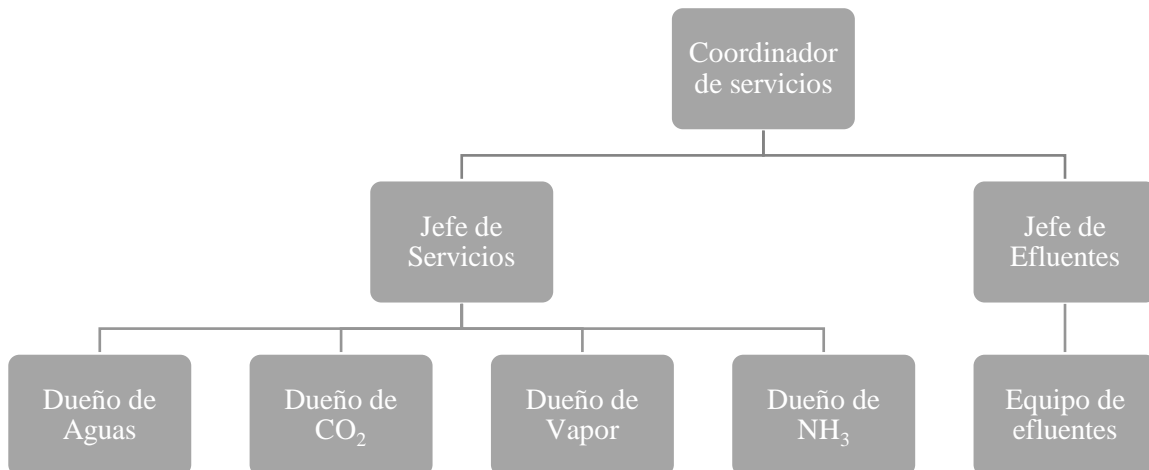


Figura 4-3: Estructura de la organización de Servicios.

Fuente: Elaboración propia.

Ambos equipos de servicios trabajan con una dinámica de horarios que divide la jornada de 24 horas en 3 bloques de 8 horas: turno nocturno (0:00-8:00), turno de mañana (8:00-16:00) y turno de tarde (16:00-0:00). Adicionalmente, existe un turno especial entre las 11:00 y 15:00 para contar con personal extra durante el día. La división del equipo de Servicios se puede caracterizar como se muestra en la **Figura 4-3**.

Por cómo están definidas, las responsabilidades del coordinador de Servicios son similares a las de una gerencia, similar al gerente de elaboración. El coordinador debe velar por la producción de los facilitadores y está sujeto a evaluación por indicadores de desempeño, tales como los indicadores de seguridad (incidentes, accidentes, fatalidades) y los de desempeño operacional (volumen medio de consumo de vapor, CO₂, y agua).

Para la descripción del cargo se solicita un rol más administrativo que gestiona y administra los recursos de Servicios, así como los tiempos de producción y mantenimiento. Actualmente no se cuenta con un cuadro descriptivo de rol formal.

Los facilitadores de Servicios tienen uso para lo que son también los procesos de envasado del producto terminado, ya sea en los formatos embotellados o enlatados, donde los sistemas de lavado de botellas de vidrio recuperadas, el envasado propiamente tal, y la pasteurización, junto con los sistemas neumáticos de automatización son directos dependientes del correcto funcionamiento de los equipos de Servicios.

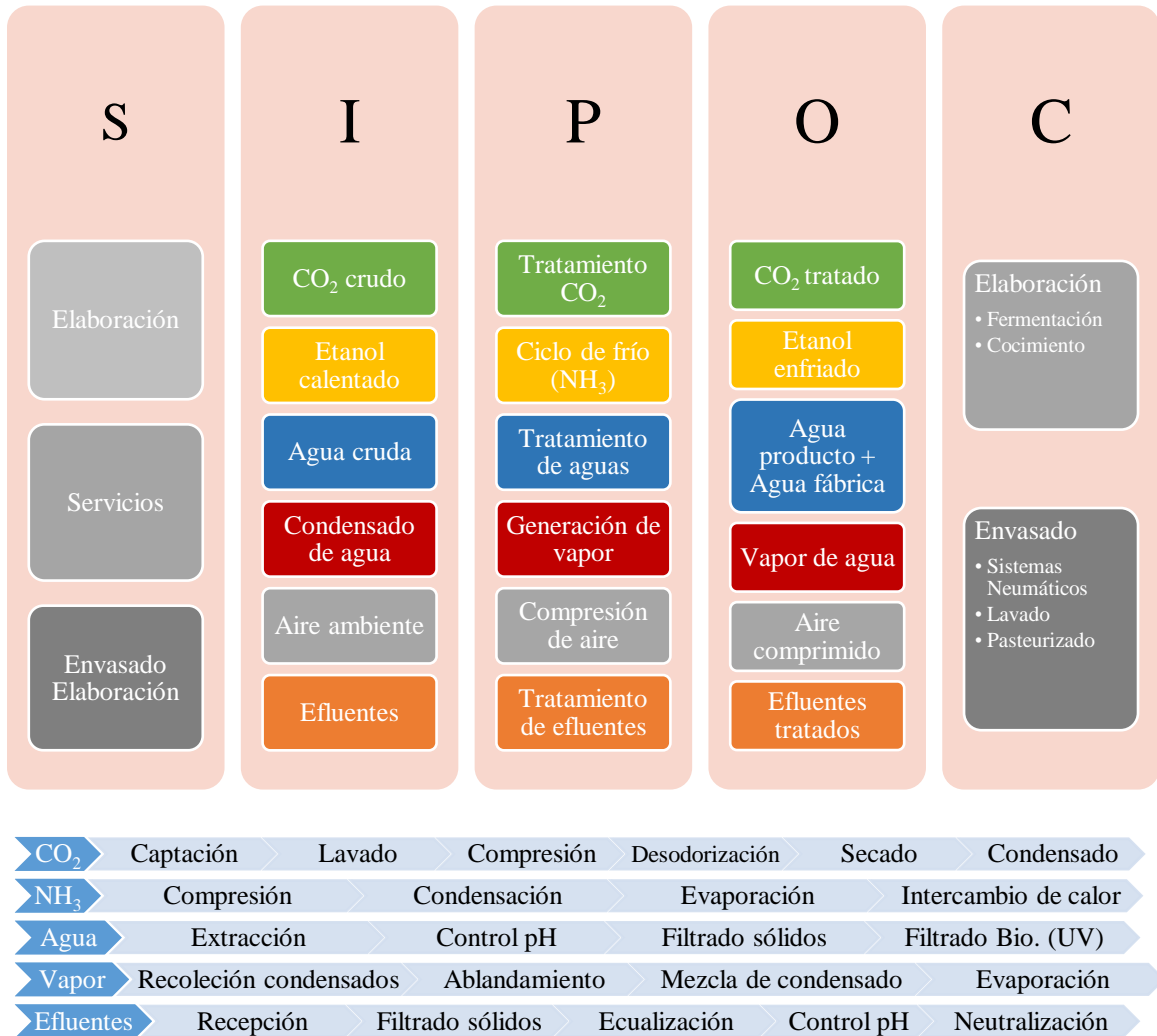


Figura 4-4: Diagrama SIPOC del sector de Servicios.

Fuente: Elaboración propia.

En este proceso de gestión de planta se definen a los **stakeholders internos**: la gerencia de operaciones; el cuerpo administrativo de Elaboración; su coordinador de Servicios, quien encabeza el equipo que se encarga de las tareas de operación y mantenimiento de los equipos de servicios industriales; y al departamento de mantenimiento, quienes proveen a los especialistas de mantenimientos según lo requiera la tarea. Adicionando, los **stakeholders externos** incluyen a aquellos entes fiscalizadores como lo son el SEREMI de Medio Ambiente y el de Salud que vela por el cumplimiento de condiciones ambientales y sanitarias que le corresponden a una planta de producción de alimentos, finalmente a la lista se suman los sectores aledaños a la planta que incluyen a otras fábricas, casas matrices y tiendas departamentales.

Es, a raíz de los procesos mostrados anteriormente, que la organización de servicios responde a una estratificación de roles de liderazgo y responsabilidad para cada miniplanta del sector, sin embargo, el equipo responde como una unidad completa, en la cual todos sus operadores funcionan con la misma capacidad de respuesta y técnica para funcionar de forma homogénea, independiente del sector. La única excepción es con el caso de efluentes, donde sus operadores no intercambian tareas con el resto de los equipos; lo que se justifica en primera instancia por la criticidad del fluido de trabajo (efluentes) con los que se trabajan en la miniplanta de tratamiento.

4.1.2. Sobre los estándares

Como parte de la cultura de la sustentabilidad y la excelencia industrial, la organización se ha planteado cumplir con indicadores establecidos por la directiva global, con el fin de medir el rendimiento de las distintas plantas entre sí, y en comparación al rendimiento de periodos de prueba anteriores (evaluaciones cuatrimestrales). Estos indicadores engloban criterios de producción, logística, seguridad, medio ambiente, calidad de vida laboral, y tiempos de utilización de activos en la planta. La definición de estos indicadores y sus valores de referencia son de exclusiva definición de la dirección global. Para este trabajo destacan dos indicadores; el primero que afecta directo al encargado de Servicios, que es la tasa de incidentes y el segundo, una tasa de disponibilidad que está estrechamente relacionado al funcionamiento y confiabilidad de los equipos del sector. Sobre las métricas de interés se hablará en mayor profundidad en la sección **4.2 Métricas**.

4.1.3. Estudio de criticidad

La planta cuenta con un sistema de gestión adoptado para mejorar el manejo de distintos pilares fundamentales del proceso de fabricación, como una consecuencia del compromiso con la calidad, seguridad y estandarización. Este sistema de gestión define para el pilar de mantenimiento una matriz de criticidad para evaluar sus equipos más y menos críticos.

La dirección define la matriz de criticidad mediante 9 criterios, los cuales se detallan a continuación:

Item	Clasificación de impacto				Peso ponderado
	Si	No			
Equipo Stand-by	0	10			4
Funcionamiento continuo	10	0			5
Equipo de reserva	0	10			2
	Bajo	Medio	Alto		
Impacto en la producción	0	5	10		10
Impacto en la calidad	0	5	10		10
Pérdidas	0	5	10		6
Frecuencia de fallas	0	5	10		8
Riesgo de seguridad o medio ambiente	0	5	10		10
	< 1min	30-60 min	60-120 min	> 120 min	
MTTR	1	4	7	10	8

Figura 4-5: Definición de impacto y peso ponderado de los criterios para construir la matriz de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

Así, es posible tener una métrica de criticidad de equipos conocida como *índice de criticidad* determinado por la suma de las ponderaciones de cada criterio multiplicado por su clasificación de impacto.

$$I_c = \sum(I_i \times P_i)$$

Ecuación 4-1: Cálculo del índice de criticidad de un equipo, donde I es el impacto del criterio y P , su peso ponderado.

Fuente: TurMec [1].

La dirección define así la criticidad de un equipo y los clasifica bajo un sistema de graduación como se muestra a continuación:

Tabla 4-1: Clasificación de criticidad de equipos.

Fuente: Elaboración propia.

Valor de I_c	Clasificación de criticidad del equipo
Mayor a 500	A
Entre 350 y 500	B
Menor a 350	C

4.1.4. Estudio de mantenimiento

Como consecuencia de esta alta población de equipos críticos, no se puede tener una priorización eficiente en cuanto a la prevención del mantenimiento. Esto puede dar cabida a distintos tipos fallas operacionales, algunas de mayor gravedad que otras. De esta forma, la planta define su plan de mantenimiento como **correctivo a la falla** para todos los equipos. Esto quiere decir que no se realizan inspecciones rutinarias o sintomatológicas a los equipos que se definen como críticos, sino que las intervenciones se realizan solo cuando el equipo presenta una falla evidente (independiente de si esta afecta o no a la actividad operativa del equipo).

Existe una excepción a este enfoque correctivo del mantenimiento. Se estableció un protocolo de mantenimiento preventivo conocido como *parada general*, que se realiza de forma trimensual, y por sector de producción, con el objetivo de llevar a todos los equipos de planta a condición inicial o lo más cercano posible a ese estado. El método de esta parada general consiste en la detención sistemática de determinados sectores de la cadena de producción (para así no detener por completo la elaboración de productos) para realizar una inspección y, de ser necesario, reparaciones a los equipos del sector. Cada sector debe llevar cuenta de sus equipos (condición operativa, historial de fallas, modos de falla) a los cuales priorizarles estas inspecciones, pero debido a que el sector de servicios no logra de momento lograr una priorización adecuada, su parada general pierde eficacia de trabajo.

4.2. Métricas

Es necesario realizar un estudio comparativo de las métricas de interés que puedan afectar no solo al proyecto sino que también sean relevantes al proceso administrativo y operativo de Servicios. Para tener claridad sobre cuáles serán estas métricas es que primero se deben identificar los desperdicios que pueden afectar al proceso.

Se realizaron observaciones de los procesos, tanto administrativos como operativos dentro de lo que es la estrategia actual de mantenimiento y los trabajos afines que realizan los coordinadores y operadores del área de Servicios. En base a las definiciones de la **Tabla 3-1**, se clasificaron las observaciones en torno al enfoque de desperdicios operacionales.

Tabla 4-2: Identificación de los desperdicios (mudas) del área de servicios.

Fuente: Elaboración propia.

Desperdicio	Explicación	Tipo de desperdicio
Trabajos mal realizados	Debido a la constante ocupación de los operadores en trabajos de mantenimiento correctivo de índole reiterativa, se crea una urgencia que se enfoca más en sacar rápido los trabajos atochados que en realizarlos de forma óptima.	Defectos
Poca claridad de roles	Durante el desarrollo de los trabajos, si bien existe una claridad de quien es el responsable a cargo de la realización de estos, en el nivel operativo suele haber poca claridad sobre cuáles son las limitaciones de responsabilidad que tienen los trabajadores, o cual es el alcance de sus perfiles de trabajo.	Capacidad sin provecho
Faltas de comunicación efectiva	Durante las reuniones diarias de seguridad, se deben rendir PI's y KPI's de calidad, mantenimiento, producción, y seguridad. Estos indicadores son detalladamente vistos y discutidos para la porción de Elaboración. Sin embargo, para Servicios la revisión es superficial y limitada de tiempo, resultando en que el Coordinador de Servicios no logra comunicar a la mesa la situación actual de Servicios y el gerente de EyS le exige resultados sin pleno conocimiento de las condiciones del área.	Proceso innecesario
Presupuesto de mantenimiento	Al tener una alta variedad de trabajos críticos, actualmente el área de servicios cuenta con una alta variedad en lo que respecta a su presupuesto de mantenimiento. Este presupuesto involucra tanto costos de reparación, como horas extras para los operadores y las impredecibles horas de inoperancia. En algunos casos se ven en la obligación de comprar insumos (específicamente CO ₂) que deberían recuperarse de la producción de cerveza, sin embargo la recuperación queda inutilizada debido a la parada de un equipo.	Transporte

Es en base a observaciones realizadas, los propios objetivos de la compañía, y la identificación de desperdicios enlistada anteriormente es que se define el siguiente diagrama de árbol de métricas, con el cual se procederá a trabajar para el análisis de mejora. Esta hipótesis de métricas se respalda con un análisis de causa raíz derivado de los diagramas Ishikawa mostrados de la figura **Figura A-1** a la **Figura A-4**, incluidas en el **Anexo A**.

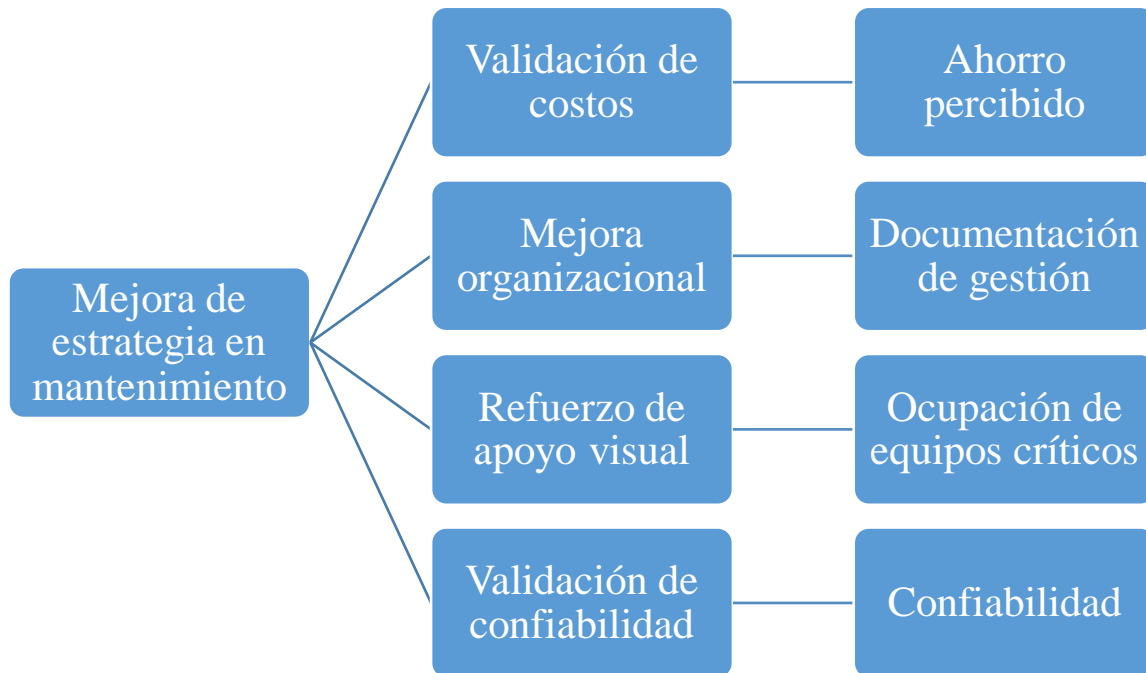


Figura 4-6: Árbol de métricas para el cumplimiento del objetivo principal del trabajo de mejora.

Fuente: Elaboración propia.

Normalmente, al momento de priorizar los desperdicios, se realiza una valoración que pondera la frecuencia de ocurrencia de cada uno de estos, y se los compara con un valor que ayuda a clasificar la gravedad o impacto que estos eventos generan con el fin de poder otorgar una métrica del tipo Jack/Knife, y así poder valorar algún tipo de prioridad para tratamiento. Sin embargo, para este estudio se opta por no realizar tal valoración y continuar el trabajo para buscar un tratamiento sin priorización especial. Esta decisión se toma, en parte, debido a que las frecuencias de ocurrencia son consistentes en el tiempo y a priori, todas son de similar importancia e impacto para los cumplimientos de los objetivos de la dirección.

Como se dijo con anterioridad, la organización cuenta con diversas métricas con las cuales se audita para cumplir con los objetivos organizacionales de sustentabilidad y excelencia. La dirección se enfoca en la defensa de varios pilares fundamentales que cada área debe sustentar para los periodos de auditoría. Estos pilares se miden en las dimensiones de logística, mantenimiento, People (calidad de vida laboral), HSMA (higiene, seguridad, y medio ambiente), y calidad.

Una métrica que ha de ser considerada será la distribución cuantitativa de los equipos críticos, ya que es importante definir dentro del contexto interno aquellos equipos que deban recibir una priorización que sea coherente con la realidad de los recursos destinados al mantenimiento y estudio de riesgo, y que además permita cumplir con los objetivos de la dirección.

Con la estratificación de criticidad mostrada en la sección anterior se tienen definidos los equipos de mayor criticidad. A continuación se presenta el resumen de representatividad de estos equipos, un desglose más detallado se puede referenciar en el **Anexo A**.

Tabla 4-3: Tasa de ocupación de equipos críticos del área de servicios [Inicial].

Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de equipos críticos	[%]
A	88,9
B	9,5
C	1,6

Resulta notorio un sesgo hacia la clasificación de criticidad más alta. En este caso ocurre que la organización a cargo de realizar los planes de mantenimiento y la ejecución de dichos planes se encuentra constantemente concentrando una parte importante de sus recursos, tanto humanos como monetarios, en una gran porción de equipos denominados como críticos. Sin embargo, es necesario mencionar que aquellos equipos considerados como críticos no pueden ocupar un porcentaje demasiado alto en lo que respecta a la población de equipos en un layout industrial. Al tener una cantidad mayoritaria de equipos críticos en la estratificación establecida se llega a una dolencia donde prácticamente todo equipo es crítico y prioritario para realizarle los mantenimientos correspondientes, esto genera una dificultad de discernimiento, donde si todo es prioritario, entonces la noción de *prioridad* pierde relevancia.

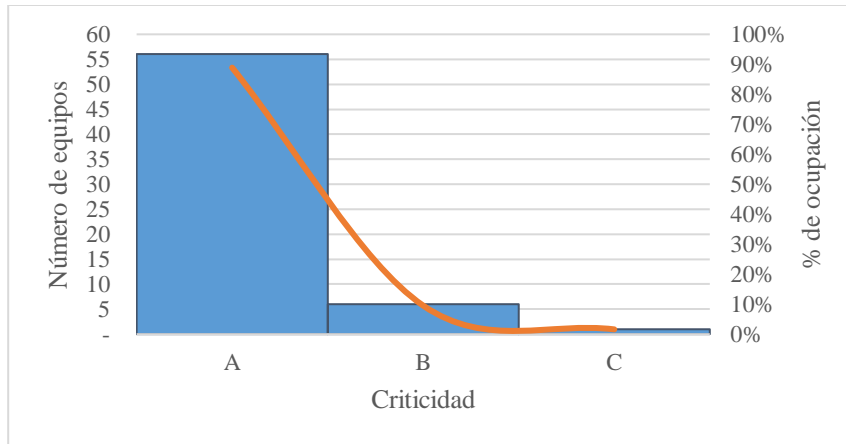


Figura 4-7: Histograma característico (azul) por criticidad de equipos en planta de Servicios, junto con la curva de ocupación porcentual (naranja) [Inicial].

Fuente: Elaboración propia.

Durante el estudio de los equipos presentes en la planta de servicios industriales, se halló que la lista presentada en la **Tabla A-1** contiene una gran variedad de equipos que son considerados como prioritarios para la destinación de recursos de mantenimiento, siendo que algunos se encuentran fuera de operación o incluso en calidad de *inexistentes*. A eso se agrega la condición de que existen equipos y sistemas recién instalados que no figuran en la lista de criticidad. Esta doble dolencia para la priorización de activos críticos presenta un problema para la dirección responsable de tomar decisiones derivadas de este tipo de información. Es por esto por lo que se decide por resolver de forma inmediata la situación (*quick win*) con una actualización de la lista de equipos y su reevaluación con respecto a los criterios de criticidad, resultante en el siguiente gráfico de clasificación (**Figura 4-8**), derivado del nuevo desglose que se puede referenciar en el **Anexo A**.

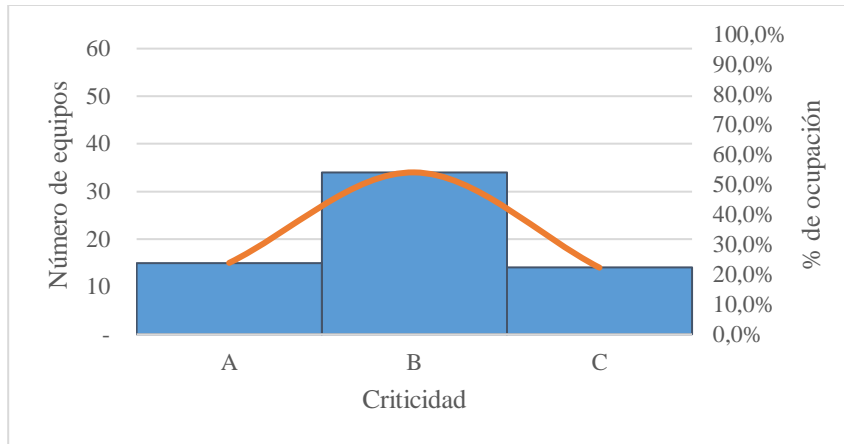


Figura 4-8: Histograma característico (azul) por criticidad de equipos en planta de Servicios, junto con la curva de ocupación porcentual (naranja) [Final].

Fuente: Elaboración propia.

Será a raíz de esta nueva clasificación que se hará posible elegir con mayor sensatez el activo crítico cuyo estudio de mantenimiento se llevará a cabo. De esta clasificación se rescatan los siguientes equipos de mayor criticidad y se procede a escoger aquel que posea el mayor índice de criticidad.

Tabla 4-4: Selección del activo con mayor índice de criticidad entre aquellos de clasificación A.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	I _c	Equipo	I _c
Compresor de aire 5	530	Compresor CO ₂ UNION	550
Compresor de aire 6	530	Compresor CO ₂ NEA	550
Secador externo	530	Compresor de NH ₃ MYCOM	550
Compresor de NH ₃ 5	500	Evaporador de CO ₂ c/vapor	560
Compresor de NH ₃ 8	500	Evaporador de CO ₂ atmosférico	560
Condensador evaporativo de NH ₃ 5	500	Pozo de agua 1	550
Condensador evaporativo de NH ₃ 8	500	Pozo de agua 2	550
Evaporador de NH ₃ 5	500	Pozo de agua 3	550
Evaporador de NH ₃ 8	500	Pozo de agua 4	550
Caldera vapor 3	590	Pozo laberinto de efluentes	550
Caldera vapor 4	550		

Con la selección del equipo crítico, mostrado en la **Tabla 4-4**, se procede a realizar el análisis de la simulación de condiciones de mantenimiento

Como métrica de validación para el trabajo de mejora se utilizará la confiabilidad del equipo, mediante el resultado del análisis de comportamiento de falla surgido de la simulación. También se realizará una valoración económica para verificar la validez del cambio, en caso de que se obtenga un resultado favorable desde el punto de vista del mantenimiento.

En el estudio de mantenimiento correctivo, se estableció un sistema de información mediante el software de gestión SAP, para llevar un correcto registro de las paradas técnicas, fallas, e intervenciones que se realizan a los equipos. Sin embargo, debido a diversos factores de la fuerza de trabajo, este registro se encuentra incompleto y no proporciona la suficiente información para realizar un estudio representativo.

Es por lo anterior que se decide a realizar una simulación, para generar datos representativos que se adapten de mejor manera a los datos que se pueden obtener con el actual esquema de mantenimiento. Como resultado de esta simulación se generó una bitácora de fallas, donde se detallan la fecha de ocurrencia y los tiempos que estuvo detenido el equipo. A partir de la **Tabla A-3**, incluida en el **Anexo A**, se genera un el siguiente cronograma de fallas. El cual será asignado al activo crítico seleccionado para análisis y será la base para un estudio de mantenimiento basado en confiabilidad más detallado en la siguiente sección de este capítulo.

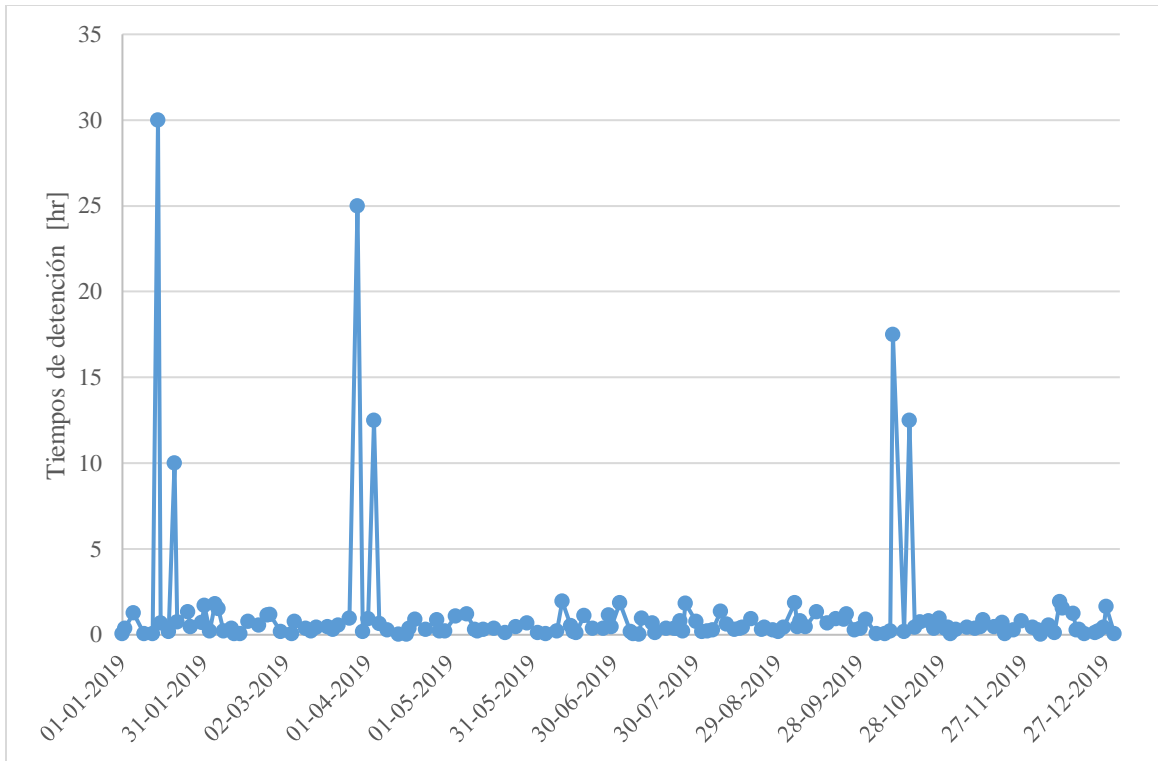


Figura 4-9: Cronograma de tiempos de detención por cada evento registrado en el activo crítico en su bitácora de fallos para el periodo 2019.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis

En esta etapa del trabajo es de interés realizar un estudio de causas que pueden ser las causantes de los desperdicios operacionales identificados en la sección anterior. Es por eso que para continuar con la metodología de mejora, se realiza un diagrama que ayuda a clasificar las causas de los desperdicios clasificándolos por alguna de las 6M; Materiales, Maquinaria, Mano de obra, Medio ambiente o entorno, Métodos, y Mediciones, como principales aportadores de variabilidad para las problemáticas.

El formato de análisis inicial escogido es conocido como diagrama Ishikawa (o espigas de pescado), al ser un método gráfico relativamente sencillo que permite relacionar efectos o problemas con sus posibles causas [3]. En esta etapa se generaron cuatro de estos diagramas (ver **Anexo A**), y se procederá a estudiar las posibles causas.

En primera instancia, en la **Figura A-1** se determina que la falta de comunicación efectiva sufre de dolencias que se derivan directamente de la

cadena de mando, y los procesos comunicacionales que persisten en una burocracia que puede entorpecer dichos contactos. Esta desintegración aparente del entorno profesional puede ser, a la vez, la causa de un ambiente tenso, donde la propia mano de obra siente que las problemáticas operacionales no reciben la atención que otras áreas sí. El ejemplo más notorio de esta desintegración se refleja en las reuniones diarias de producción, donde se ven a fondo los temas de productividad, mantenimiento, seguridad, y medioambiente, entre otros indicadores. En estas reuniones se otorgan alrededor de 20 minutos para exponer los temas de Elaboración y apenas 5 minutos para informar sobre los estados de Servicios, esto último hace que el coordinador de servicios gestione su área casi con el desconocimiento del gerente de EyS.

Siguiendo con esta línea, en la **Figura A-2**, se tiene que el entorno facilita una fluidez de trabajo, donde gran parte del equipo desempeña labores similares. En principio esto resulta ser una ventaja, dado que se tiene un entorno de trabajo como una sola unidad, sin individualismo. Sin embargo, en casos de ausencias o rotaciones irregulares de los operadores del área, ocurre que se presentan situaciones donde no se tiene claridad de quiénes son los reemplazantes formalmente definidos para suplir las ausencias, o cuáles son los protocolos para delegar funciones de forma más concreta.

A continuación, en la **Figura A-3**, se observa que los trabajos mal realizados pueden tener numerosas fallas, donde vuelven a surgir los problemas comunicacionales y la preparación del equipo de trabajo como principales factores. Otra posible causa que se determina es el hecho de que los criterios de criticidad actuales presentan una dolencia desde el punto de vista práctico. Dado que es en extremo difícil realizar bien uno o varios trabajos cuando no se tiene la confianza o claridad suficiente como para determinar una priorización que sea coherente con un ambiente de trabajo saludable. En este ámbito y a priori, se puede decir que las evaluaciones de criticidad presentan una oportunidad inmediata de mejora, de la cual se hablará más adelante, en la sección **4.4 Propuesta de mejora**. Desde el punto de vista de mantenimiento, se determina una causa interesante sobre la maquinaria y los equipos, y es que estos presentan una tasa de falla creciente, lo que puede estar relacionado a las reiteradas intervenciones realizadas de forma correctiva, según informan los mismos operadores.

Finalmente, en la **Figura A-4**, se determina las posibles causas de que el presupuesto de mantenimiento presente no solo una consistente irregularidad, sino que también represente una porción de costos importante para la empresa.

Se determina como posibles causas de un elevado presupuesto de mantenimiento, condiciones de falla que se ven soportadas por una tasa de fallas creciente y las elevadas intervenciones correctivas que se realizan. Por otra parte, los tiempos muertos asociados a estas numerosas fallas presentan no solo costo de mantenimiento, sino que también tiempos de inoperancia que le cuestan dinero a la empresa. Además, se tiene la posible causa relacionada a repuestos, al trabajar con equipos y maquinaria proveniente del extranjero, se presenta una dolencia asociada a la tardanza que se tiene en el envío y llegada de estos repuestos, junto con la ausencia de estos en primer lugar. Además, respecto a las intervenciones, es necesario mencionar las horas extras a las que se ven comprometidos los trabajadores para realizar los trabajos cuando estos son de extrema urgencia, o cuando su neutralización resulta ser más trabajosa de lo esperado. Si bien los pagos de extensión de jornada, alimento y facilitación de transporte pueden ser un costo marginal dentro del global de costos empresariales. Al ser reiterativos en el tiempo pueden empezar a representar un costo considerable, el cual a su vez es perfectamente evitable.

A continuación se realizará un estudio más técnico respecto a las problemáticas del mantenimiento.

Para el activo crítico seleccionado, en este caso la Caldera a vapor #3, se realizará una simulación del comportamiento de falla. Mediante una generación programada de datos se genera una bitácora de fallas (**Tabla A-3**), en la cual se establecen las fechas en las que ocurre un evento que se relacione a un evento de mal funcionamiento (o ausencia de este), junto a la duración de dicho episodio. La simulación recopila las duraciones de eventos dentro de cuatro (4) categorías; *< 1 min, 1-30 min, 30-60 min, 60-120 min, y < 120 min.*

A partir de la data, se obtiene un cronograma de fallas (**Figura 4-9**) con el cual se generó el siguiente diagrama que pondera la frecuencia de ocurrencia de los eventos con su respectivo impacto en referencia al tiempo en que estos pueden resolverse.

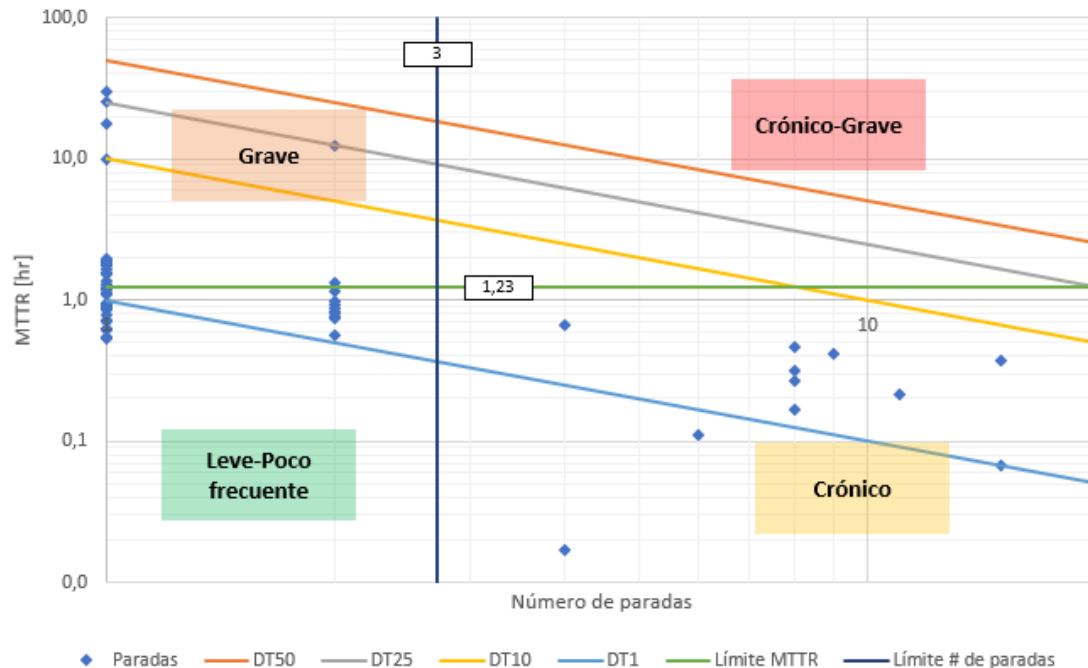


Figura 4-10: Diagrama Jack-Knife de los eventos de falla expresados en escala logarítmica, mostrando los límites del número de fallas y horas de MTTR delimitando las regiones de clasificación de eventos.

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 4-10** de ponderación de frecuencias muestra una tendencia de los eventos de falla hacia la zona de clasificación Crónica. Esto quiere decir que las paradas pueden tener una misma causante y, al ser de una alta frecuencia, indican que la confiabilidad del equipo es baja. Por otra parte los eventos no sobrepasan el límite de MTTR promedio (línea verde en gráfico Jack/Knife), por lo que se puede aseverar que la mantenibilidad del equipo en cuestión es aceptablemente eficiente. Es por lo anterior que se hará especial enfoque en la confiabilidad del equipo, más en que en la mantenibilidad de este, para lo cual se realizara una cuantificación de la confiabilidad basándose en los parámetros de distribución Weibull, los cuales pueden ser generados a partir de la misma data proporcionada.

Se pretende realizar un estudio de confiabilidad basándose en que la data siga una distribución paramétrica de Weibull, para lo cual se realizarán dos pruebas de bondad de ajuste para su validación; Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling, con hipótesis nula (H_0) suponiendo que la data se ajusta a una distribución de Weibull con valor de significancia $\alpha = 0,01$. Estas pruebas de bondad se aplicarán a la distribución del MTBF (como se definirá más adelante) y el detalle relevante a sus estadísticos de contraste se puede referenciar en el

Anexo B. Mientras que, en el **Anexo A**, se presentan los resultados de dichas pruebas.

Como se aprecia en la **Tabla A-4**, ambas pruebas de bondad indican que no se puede aceptar la hipótesis de que los datos sigan una distribución de Weibull. Pese a este resultado se decide continuar con el estudio, debido a que el enfoque principal de este trabajo de análisis se centra en el tratamiento posterior de datos y su respectiva toma de decisiones, y no en la colección de la data misma.

Según se señala en [7] el primer paso involucra la clasificación de los tiempos medios entre fallas. Como en esta simulación se tiene sólo la bitácora con las fechas y no los horarios de cada evento, se procede a estimar un MTBF tomando un patrón semanal de cálculo. Para esto se definen tres parámetros: el tiempo T_0 , que se tomará como el tiempo total de referencia (en este caso una semana, 168 horas); t_i , que será la duración de cada evento de falla; y N , que será el total de eventos durante el tiempo de referencia. Por lo tanto se tiene que:

$$MTBF_{semanal} = \frac{T_0 - \sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

Ecuación 4-2: Estimación de tiempo medio entre fallas semanal.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de este tiempo medio entre fallas se procede a ordenar los datos de eventos de forma creciente según la duración de estos MTBF. A este orden de datos se les aplicará las funciones de estimación de rango de mediana y regresión lineal, generando así la **Tabla A-4: Resultados de las pruebas de bondad de Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling. Obtención de (*) y (**)** detallada en el Anexo B.

Fuente: Elaboración propia.

Test	Estadístico de contraste	Valor crítico	Criterio para aceptar H_0	Resultado
K-S	$D^* = 0,277$	$D_\alpha = 0,140$	$D \leq D_\alpha$	NO se acepta
A-D	$A^{2**} = 3,158$	$A_c = 0,752$	$A^2 \leq A_c$	NO se acepta

Tabla A-5, con la cual se procede con la generación de los gráficos de regresión lineal. Los cálculos relativos a la estimación del rango mediana y regresión lineal se pueden referenciar en el **Anexo B**.

La literatura sugiere, tal como se determina en el primer caso, una suposición inicial de $\delta = 0$. Este primer supuesto debe ser evaluado según la forma del gráfico, o bien el valor inicial del parámetro de forma (β) [7]. En el primer caso se aprecia en **Figura 4-11** un abrupto cúmulo de datos por la izquierda del gráfico, un indicador cualitativo que señala que es necesario una corrección en cálculo del factor de localización. Para esta corrección se hace uso de la función Solver de Excel para maximizar el valor del factor de correlación R^2 (ya que se busca que logre un comportamiento lineal de datos) variando el valor de δ . El resultado que se muestra en la **Figura 4-12** evidencia un cambio sustancial en la forma de la gráfica y también en el valor del factor de correlación (el cual pasa de 0,7592 a tener un valor de 0,8947). Siguiendo entonces con el análisis de la regresión lineal se desprenden los siguientes valores de los parámetros de la distribución de Weibull.

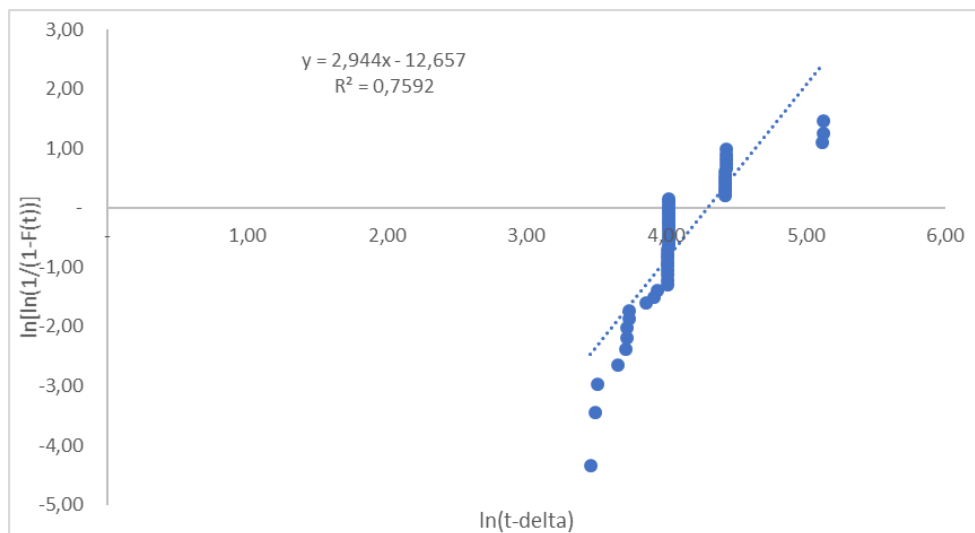


Figura 4-11: Trazado de la recta de regresión con $\delta = 0$.

Fuente: Elaboración propia.

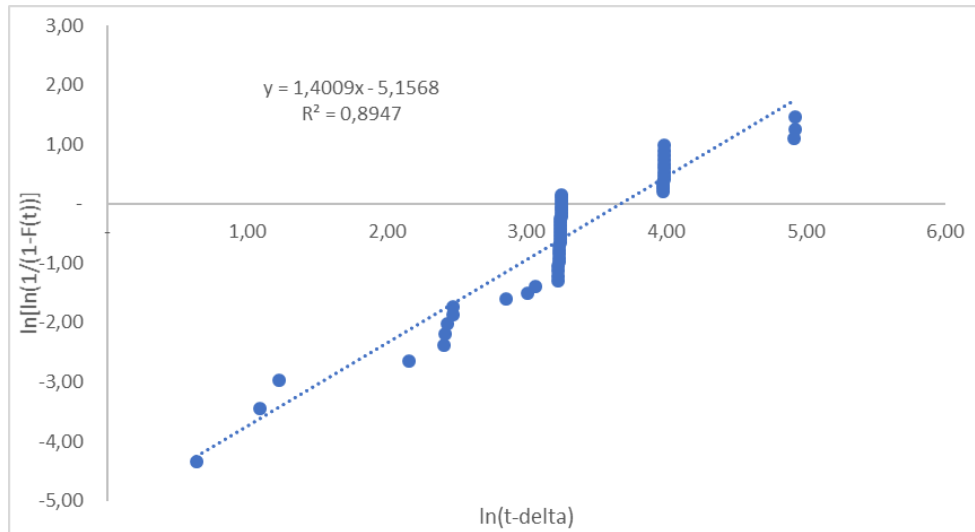


Figura 4-12: Trazado de la recta de regresión con $\delta = 29,9$ [hr].

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-5: Parámetros de distribución Weibull derivados del estudio de regresión lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Para $\delta = 0$ [hr]	Para $\delta = 29,9$ [hr]
De forma (β) [-]	2,94	1,40
De escala (θ) [hr]	73,6	39,7

Con los datos de corrección, derivados del cálculo del parámetro de localización (ver **Anexo B**), resulta entonces la función de confiabilidad característica del equipo como.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-29,9}{39,7}\right)^{1,40}}$$

Ecuación 4-3: Función de confiabilidad del activo crítico.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la **Tabla 4-5**, los valores del parámetro de forma (β) indican que el equipo está en una etapa de vida de desgaste, o tasa de falla creciente. Este es un indicativo de que el enfoque correctivo no resulta ser la mejor opción, y debiese optarse por una estrategia para mantenimiento del tipo

preventivo. En la próxima sección se dará una demostración que justifica este cambio de estrategia de mantenimiento, no solo desde el punto de vista de la confiabilidad, sino que también desde una perspectiva de costos.

4.4. Propuesta de mejora

En lo que respecta a la comunicación efectiva ente áreas, al investigar sobre la organización global de las plantas de producción, se encontró que, en algunas de las filiales de Europa y América del sur, están brindando a la coordinación del área de Servicios industriales una participación independiente en la mesa directiva de sus respectivas plantas, lo que quiere decir que la coordinación de servicios cuenta con un cargo gerencial que opera de forma paralela a la de elaboración. Siendo este el caso, y a la espera de confirmar el efecto coordinado que esto tenga en la organización, se decide por recomendar una disociación del área de Elaboración y Servicios en dos departamentos independientes, con las mismas facultades organizacionales. En términos operacionales, parece ser sensata, debido a las interacciones que posee el área de servicios mostradas en la **Figura 4-4**, la decisión de hacer de Servicios un departamento propio dentro del organigrama de planta, el cual no debiese mostrar un cambio sustancial, sino que subir un escalafón dentro de la dirección en planta. Con el propósito de brindar antecedentes y material de apoyo para este posible cambio en la organización, es que también se preparó un formato tentativo de roles que definen las responsabilidades de los encargados de área en sus distintos escalafones de jerarquía, incluyendo formación deseable, superiores directos y reemplazantes en caso de ausencias extraordinarias. Este material se detalla en el **Anexo A** entre las tablas; **Tabla A-6** y **Tabla A-12**.

Una de las primeras oportunidades de mejora de las que se habló fue la de reevaluar los activos críticos de la planta, una tarea que se ejecutó durante el análisis mismo de criticidad. Como medida de estandarización, y considerando la vida útil y la rotación de muchos de los subsistemas que conforman al área de Servicios, se sugiere que se mantenga como apoyo visual constante un histograma similar a la **Figura 4-8** para realizar seguimiento a la población de activos con sus respectivas criticidades, junto con una reevaluación de los activos de forma anual o ante el retiro o incorporación de algún equipo que pueda ser sustancial al sistema de producción.

Basándose en los datos obtenidos de la simulación de condiciones de falla (**Tabla 4-5**), se puede inferir que el equipo en cuestión se encuentra en una etapa de vida de desgaste ($\beta > 1$), lo que llama a emplear un enfoque de mantenimiento que se centre la previsión y no reacción [13]. Como siguiente paso en el camino

al TPM, que es lo que busca la empresa, se recomienda realizar un cambio a mantenimiento cíclico, el cual es un método derivado del mantenimiento preventivo.

Un estudio financiero será llevado a cabo para verificar el provecho financiero de la nueva estrategia de mantenimiento. Para lo cual se establecen los siguientes factores monetarios, referenciados a partir de una base de datos otorgada por [14].

Tabla 4-6: Factores financieros a considerar para la evaluación de factibilidad económica del cambio de estrategia de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Factor económico	Monto [CLP]
Facturación anual promedio	362.898.000.000
Costos variables (estimados en 40% de la facturación)	145.159.000.000
Costos de mano de obra (preventiva por hora)	500.000
Costos de mano de obra (correctiva por hora)	1.000.000
Costos de inoperancia (por hora)	24.856.000

La información con respecto a los tiempos de mantenimiento y base de operación se presenta de forma referenciada a un estimativo entregado por la misma experiencia de los operadores que realizan las intervenciones.

Tabla 4-7: Factores de tiempos de mantenimiento a considerar para la evaluación de factibilidad económica del cambio de estrategia de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Factor temporal de mantenimiento	Valor [hr]
Tiempo base (anual)	8.760
MTTR estimado (preventivo)	10
MTTR estimado (correctivo)	24
t_p (tiempo de evaluación recomendado)	24

Como se aprecia en la **Tabla 4-8**, el objetivo no es lograr un mínimo de costos de mantenimiento, de ser así la proyección apuntaría a realizar los trabajos de mantenimiento de forma casi constante (a menores intervalos de tiempo, menores costos). Lo que se busca es llegar a un balance de costos que pueda ser conveniente, el cual correspondería a realizar un *mantenimiento preventivo cíclico* cada 54 horas.

Tabla 4-8: Análisis financiero de la estrategia de mantenimiento preventivo cíclico.

Fuente: Elaboración propia.

t_p [hr]	F(t_p)	R(t_p)	MTTR $_{t_p}$ [hr]	MTBF $_{t_p}$ [hr]	MTBM $_{t_p}$ [hr]	E _c [CLP/hr]
30	0,000	1,000	10	–	–	
54	0,392	0,608	15	42	49	3.800.000
78	0,730	0,270	20	53	60	5.674.000
102	0,900	0,100	23	60	64	6.437.000
126	0,968	0,032	24	64	66	6.722.000
150	0,991	0,009	24	66	66	6.817.000
174	0,998	0,002	24	66	66	6.846.000
198	0,999	0,001	24	66	67	6.853.000

Para mostrar el cambio que significa esta nueva política de mantenimiento, se presentará la comparación de costos basándose en las intervenciones tanto preventivas como correctivas. Este cambio se muestra a continuación en la **Tabla 4-9**.

Tabla 4-9: Contraste de presupuestos entre la estrategia de mantenimiento actuales y la propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

Estrategia	Intervenciones		Presupuesto [CLP]	Diferencia
	Preventivas	Correctivas		

Actual	4	90	55.868.976.533	-40,42%
Propuesta	93	60	33.255.578.034	

Junto con esta comparación financiera, es necesario verificar que la disminución de costos en el presupuesto conlleva algún beneficio en la confiabilidad del sistema. A partir de la data presentada en la **Tabla A-3**, se pudo caracterizar la función de confiabilidad dado los periodos de falla que se simularon para el equipo. Esta función de confiabilidad se puede evaluar para el MTBF promedio anual determinado a partir de la **Ecuación 4-2**, y así se permite una comparación cuantitativa de la reforma de estrategia de mantenimiento, mostrada en la **Tabla 4-10**.

Tabla 4-10: Contraste de confiabilidades evaluadas mediante tiempo medio entre fallas para la situación actual y la nueva propuesta de mantenimiento. (*) Valor de MTBF estimado del promedio por semana.

Fuente: Elaboración propia.

Estrategia	MTBF [hr]	Confiabilidad R	P.P.
Actual	65,4*	43,8%	+38.9
Propuesta	42,0	82,7%	

Como se aprecia en las tablas **Tabla 4-9** y **Tabla 4-10**, no solo se puede percibir un ahorro considerable a partir de un cambio operacional en la forma de realizar el mantenimiento, sino que también se puede estimar un aumento de casi 40 puntos porcentuales en la confiabilidad del equipo en cuestión. Este resultado puede no solo significar una ganancia en productividad a nivel de empresa, sino que también puede representar un factor importante en la seguridad de los trabajadores y los equipos que conforman la planta de servicios, además de significar un avance considerable en lo que respecta a las metas que pretende lograr la administración en su evolución de la forma en que se realiza el mantenimiento.

Basándose en estos resultados, se realiza una recomendación para implementar una estrategia preventiva de mantenimiento cíclico. Como se estipuló anteriormente, este cambio inicial de enfoque de mantenimiento no solo significa menores costos y mejor confiabilidad, sino que también sirve como punto inicial para lograr un compromiso de participación por parte de los operadores que realizan estas intervenciones. A medida que se interiorice y replique esta costumbre de diagnosticar y acondicionar los equipos, se puede lograr que los operadores adopten un compromiso nacido de las costumbres de conocimiento de los equipos. Siguiendo los lineamientos de la organización, es posible que, con esta nueva medida, los operadores se vuelvan cada vez más dueños de sus procesos y de sus equipos, logrando finalmente avanzar hacia técnicas y enfoques de mantenimiento cada vez más autónomos, llegando así a tener una mantenibilidad autónoma total (ATO).

Capítulo 5

5. Conclusiones

En este trabajo de título se planteó una propuesta de mejora en estrategia de mantenimiento para una planta de servicios industriales con la finalidad de presentar mejoras en la confiabilidad de sus activos críticos y así sentar antecedente de análisis para lo que viene a ser un mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Como primera parte se realizó un levantamiento de los activos clave que conforman las principales áreas de producción de servicios, aquí se reconoció la participación de los equipos de generación de vapor (calderas), ciclo de frío (compresores de amoníaco) y captación y tratamiento de CO₂ (compresor de CO₂) mostrando también el contexto operacional en el cual se involucran los equipos y porqué a priori son los equipos críticos de la planta.

Siguiendo con la metodología de trabajo planteada en el Capítulo 1, se procedió a realizar un diagnóstico de la organización y del área operacional. Se expuso sobre la organización y cómo las distintas partes del sector interactúan entre sí para llevar a cabo las actividades productivas mostrando el contexto interno del área de Servicios y participación dentro de la planta. Se expone las metas intencionadas para la excelencia de la planta, la cuales involucran seguridad y confiabilidad en el funcionamiento de sus equipos. En conjunto con estas dos variables es que se define el sistema de clasificación de criticidad, el cual mostró que un 88,9% de sus equipos de servicios están catalogados como prioritarios con respecto a la criticidad. Es a raíz de esta situación de equipos que se identifica la estrategia de mantenimiento actual como correctiva a la falla debido a la falta de priorización en la clasificación de equipos críticos.

De modo que se pueda tener una métrica de entregables con respecto al trabajo de título, se realizaron observaciones en terreno sobre cuales oportunidades de mejora se podían identificar dentro de la organización, buscando incorporar a los cargos administrativos según indica [5]. Se identificaron los desperdicios operacionales y administrativos que son de interés para el trabajo y se estipuló árbol de métricas que indica aquellas formas de medir el cumplimiento de la propuesta para mejorar.

Continuando con el proceso de mejora, se realizó en primera instancia un análisis de la ocupación de equipos críticos en planta, resultando en el razonamiento de reducir dicha ocupación a un porcentaje que permitiera discernir de mejor forma a qué equipos se le debiese brindar real prioridad para las actividades de mantenimiento, sobre todo si se trata de dar los primeros pasos hacia RCM y ATO. Se resuelve la situación reevaluando los equipos presentes en la planta y logrando

un 23,8% de equipos catalogados como críticos. Con este análisis de evaluación se logra cumplir con el objetivo tres del trabajo, dejando una recomendación para seguir reevaluando dichos activos críticos de forma periódica para evitar nuevas situaciones de falta de priorización.

Una vez determinada una población de equipos críticos más manejable, fue posible identificar aquel equipo cuya prioridad fuera realmente mayor, de aquí en adelante se entra en terreno digital, realizándosele al activo una simulación de condición de falla. La data se generó mediante valores semilla que alimentaron un algoritmo de elaboración propia que dio a lugar a los eventos de falla mostrados en la **Figura 4-9**. Se utilizaron dos herramientas estadísticas (Test K-S y Test A-D) para verificar la calidad de la data, no obstante, ambas pruebas de hipótesis resultaron no ser concluyentes con respecto al comportamiento de la data en forma de distribución de Weibull. A pesar de esos resultados, y dado que la finalidad de este trabajo se enfocó más al postratamiento que a la obtención misma de los datos es que se procedió a realizar el análisis de confiabilidad para una distribución Weibull. Mediante la simulación se llegó a que la condición de falla del equipo indica un comportamiento de desgaste, caracterizado por el parámetro beta y evidenciado en la región de Jack-Knife del tipo crónico (poca confiabilidad, aceptable mantenibilidad). Consecuentemente, mediante el análisis de parámetros indicado por [7], se llega a la función de confiabilidad del equipo, teniendo como resultante una herramienta de cuantificación para comparar la confiabilidad de este antes y después de la propuesta.

Finalmente, como propuesta de mejora se planteó el concepto de reorganización del sector de servicios como órgano independiente dentro del área productiva, debido a los desperdicios organizacionales que se identificaron a lo largo de las observaciones. Junto con esta propuesta de separación de sistemas se incluyó un plan de formato de descripción de cargo para ayudar a esclarecer las responsabilidades de los operadores y aquellos entes responsables de las actividades tanto productivas como las del mismo mantenimiento. Continuando con un lineamiento de gestión de la información, se sugiere la reevaluación periódica de los equipos críticos para así evitar la misma situación que se trató durante el trabajo, como un método *quick win* que puede resolverse de forma autónoma por los equipos de operaciones. Siguiendo con el activo crítico, se generó un análisis de costos de mantenimiento a edad constante como muestra [13] mostrando no solo una disminución del 40,42% en el presupuesto sino que también produce un mayor MTBF que se traduce en un aumento de 38,9 puntos porcentuales en la confiabilidad del activo, justificando así el cambio de estrategia de correctiva a la falla a *preventiva*

cíclica. Una estrategia que da antecedente de acercamiento al mantenimiento centrado con la confiabilidad y eventualmente un mantenimiento productivo total y autónomo, siguiendo con los lineamientos de la misión de la empresa.

Este trabajo de título se enfocó en el planteamiento inicial para lograr un proceso RCM, el cual define el contexto operativo, los equipos, y quienes trabajan en ellos, para futuros trabajos se recomienda continuar con este lineamiento centrando los estudios en las condiciones operacionales y una profundización en estudio de FMECA. Con lo anterior, el siguiente paso correspondería a una definición concreta de las tareas de mantenimiento adecuadas para el activo crítico, y cómo estas van de la mano con la gestión organizacional del riesgo. En el trabajo orientado al mantenimiento, se realizó un análisis que se centra en la confiabilidad del equipo basándose en un modelo de distribución de Weibull, el cual a su vez no pudo ser verificado mediante herramientas estadísticas. Esto puede ser consecuencia del diseño del modelo de generación de datos, el cual puede estar sujeto a muchas oportunidades de mejora. Sin embargo, puede que la distribución siguiera un comportamiento distinto, lo que generaría distintos parámetros para definir la confiabilidad de un equipo. Para futuros trabajos se recomienda realizar una verificación más profunda de la data para así asegurar el comportamiento estadístico del activo, esto junto con una medición más rigurosa de los eventos de falla. Conforme a ello, se recomienda realizar estudios de confiabilidad con respecto a las distribuciones exponencial negativo y normal, y cómo estas distribuciones pueden afectar al estudio de mantenimiento, ya sea en simulación de datos o con data entregada de forma empírica. Para finalizar, se recalca que esta es una propuesta de mejora, la cual puede ser evaluada como pertinente o no por la organización, cabe la posibilidad de que los objetivos organizacionales puedan ser satisfechos con otro tipo de solución que poca relación guardan con los estudios presentados en este trabajo, como por ejemplo la adquisición de nuevos equipos para respaldar los existentes o el remplazo total de estos. Cada estudio estará sometido a la jurisdicción de cada organización y serán aquellos quienes tomen las decisiones que mejor puedan beneficiar a la compañía.

Anexo

A. Figuras y tablas

Figuras



Figura A-1: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para falta de comunicación efectiva.

Fuente: Elaboración propia.

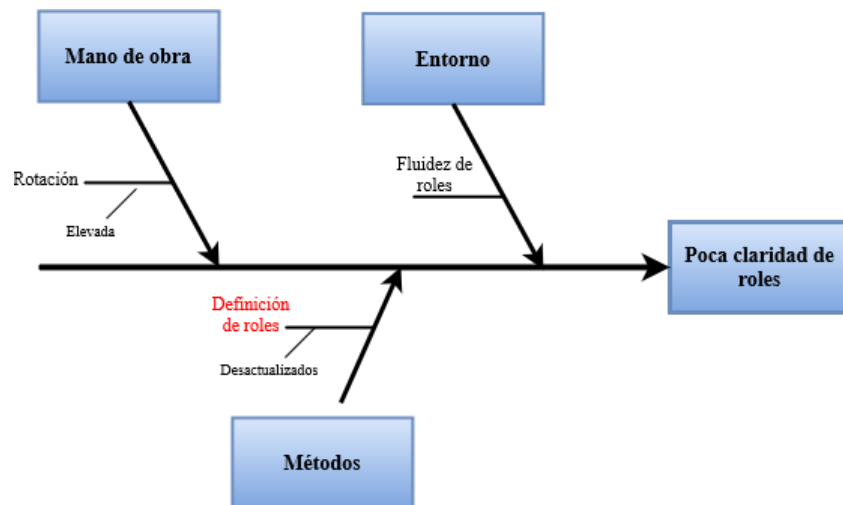


Figura A-2: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para poca claridad de roles.

Fuente: Elaboración propia.

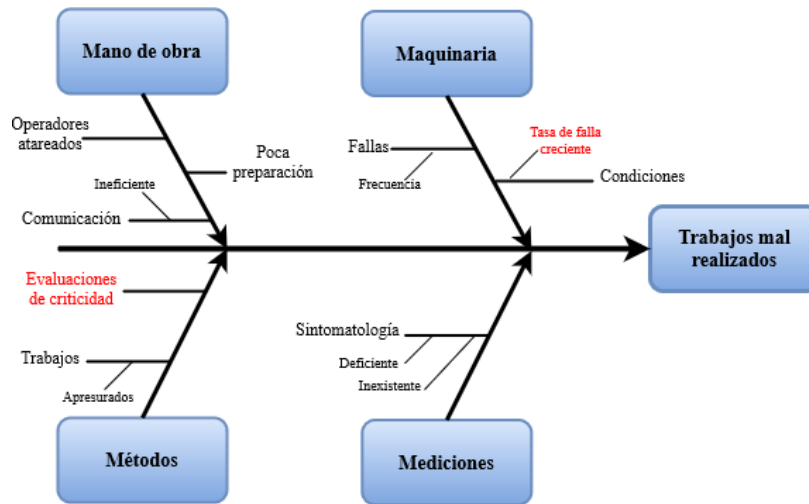


Figura A-3: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para trabajos mal realizados.

Fuente: Elaboración propia.



Figura A-4: Diagrama de Ishikawa (espinas de pescado) para presupuesto de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Tablas

Tabla A-1: Desglose de equipos clasificados por criticidad [Inicial].

Fuente: Elaboración propia

Equipo	Índice	Criticidad	Equipo	Índice	Criticidad
Pozo de agua efluentes	524	A	Pozo de agua N°1	368	A
Tanque de almacenamiento CO2 65m2	524	A	Pozo de agua N°2	368	A
Caldera Loos 3	512	A	Tanque agua retorno condensado	368	A
Tanque de almacenamiento CO2 15m2	512	A	Torre enfriamiento (Mayekawa) CO2	368	A
Compresor CO2 NEA	502	A	Torre enfriamiento (Favra) CO2	368	A
Tanque recibidor de amoniaco (1)	482	A	Compresor de NH3 N°2	362	A
Secador 3 aire	462	A	Compresor de NH3 N°3	362	A
Tanque espuma-separador de espuma	462	A	Filtro arsenico 2	362	A
Compresor NH3 MYCOM (CO2)	432	A	Filtro arsenico 3	362	A
Tanque recibidor de amoniaco (2)	432	A	Tanque almacenamiento de combustible	362	A
Tanque agua alimentacion caldera 3	424	A	Condensador de amoniaco (CO2)	352	A
Purificador CO2	418	A	Pozo de agua N°4	152	C
Reboiler CO2	418	A	Condensador de amoniaco (1)	352	A
Bomba circuito externo (3)	412	A	Recibidor de amoniaco (CO2)	352	A
Bomba circuito interno (1)	412	A	Bomba liq. CO2 condensador	348	A
Compresor N°2 aire	412	A	Bomba liq. CO2 purificador	348	A
Compresor N°3 aire	412	A	Condensador de amoniaco (3) (Jhonson Control)	348	A
Secador CO2 Columna N°1	412	A	Condensador de amoniaco (4) (Jhonson Control)	348	A
Secador CO2 Columna N°2	412	A	Bomba envío condensado (1)	342	A
Condensador de amoniaco	402	A	Bomba agua alimentacion caldera (1)	332	A
Filtros sólido GORA	402	A	Bomba agua alimentacion caldera (2)	332	A
Filtros UV	402	A	Filtro arsenico 1	332	A
Bomba circuito externo (1)	382	A	Tanque de soda recepción tk. Soda 1	324	A
Bomba circuito externo (2)	382	A	Compresor de NH3 N°4 (Frisk)	322	A
Bomba circuito externo (4)	382	A	Compresor N°4 aire	312	A
Bomba circuito interno (2)	382	A	Tanque diario diesel	312	A
Bomba circuito interno (3)	382	A	Bomba envío condensado (2)	202	B
Evaporador CO2 N°1	382	A	Compresor de NH3 N°5 (Frisk nueva)	292	B
Evaporador CO2 N°2	382	A	Pozo de agua N°3	292	B
Desorodizador CO2 columna N°1	368	A	Tanque de agua cruda	292	B
Desorodizador CO2 columna N°2	368	A	Tanque de agua tratada	292	B
			Bomba llenado cilindros CO2	268	B

Tabla A-2: Desglose de equipos clasificados por criticidad [Final].

Fuente: Elaboración propia

Equipo	Índice	Criticidad	Equipo	Índice	Criticidad
Compresor-Aire-Compresor 2	380	B	Lavadora de CO2 (NEA)	346	C
Compresor-Aire-Compresor 3	380	B	Lavadora de CO2 (Union)	346	C
Compresor-Aire-Compresor 4	380	B	Torres Secadoras CO2 (NEA)	410	B
Compresor-Aire-Compresor 5	530	A	Torres Secadoras CO2 (Union)	410	B
Compresor-Aire-Compresor 6	530	A	Evaporador de CO2 con vapor	560	A
Secador externo	530	A	Evaporador de CO2 atmosférico	560	A
Tanque Pulmón-Aire-TK Pulmon	290	C	Sistema purificador de CO2 (NEA)	410	B
Compresor-NH3-de amoniaco N° 2	480	B	Tanque de CO2 1 (63 m3)	410	B
Compresor-NH3-de amoniaco N° 3	496	B	Tanque de CO2 2 (49 m3)	410	B
Compresor-NH3-de amoniaco N° 4	480	B	Bomba de llenado de cilindros de CO2	346	C
Compresor-NH3-de amoniaco N° 5	500	A	Pozo de agua-Pozo 1	550	A
Compresor-NH3-de amoniaco N° 6	480	B	Pozo de agua-Pozo 2	550	A
Compresor-NH3-de amoniaco N° 7	480	B	Pozo de agua-Pozo 3	550	A
Compresor-NH3-de amoniaco N° 8	500	A	Pozo de agua-Pozo 4	550	A
Condensador Evaporativo de NH3 3	430	B	Tanque 1 agua cruda (600m3)	346	C
Condensador Evaporativo de NH3 4	430	B	Tanque 2 agua cruda (600m3)	346	C
Condensador Evaporativo de NH3 5	500	A	Filtro UV 1	460	B
Condensador Evaporativo de NH3 6	430	B	Filtro UV 2	460	B
Condensador Evaporativo de NH3 7	430	B	Tanque Agua Potable	346	C
Condensador Evaporativo de NH3 8	500	A	Microfiltro 1	460	B
Sistema de extracción de NH3	182	C	Microfiltro 2	460	B
Evaporador NH3 1 (Compresor 2-3-4)	490	B	Microfiltro 3	460	B
Evaporador NH3 2 (Compresor 2-3-4)	490	B	Microfiltro 4	460	B
Evaporador NH3 5	500	A	Tanque de Hipoclorito	346	C
Evaporador NH3 6	490	B	Bomba Alimentación Filtro Arsenico 1	346	C
Evaporador NH3 7	490	B	Bomba Alimentación Filtro Arsenico 2	346	C
Evaporador NH3 8	500	A	Bomba Alimentación Filtro Arsenico 3	346	C
Tanque NH3 1	370	B	Filtro de Arsenico 1	460	B
Tanque NH3 2	370	B	Filtro de Arsenico 2	460	B
Tanque receptor de etanol Sistema 1	182	C	Filtro de Arsenico 3	460	B
Tanque receptor de etanol Sistema 2	182	C	Microfiltro Arsenico 1	460	B
TK receptor etanol Sistema Estratificad	182	C	Microfiltro Arsenico 2	460	B
Torre de agua de enfriamiento 1	290	C	Microfiltro Arsenico 3	460	B
Torre de agua de enfriamiento 2	290	C	Tanque de Agua de Fabrica	346	C
Caldera Vapor 3	590	A	Tanque de Agua de Producto	346	C
Caldera Vapor 4	550	A	Bomba envío agua de fábrica 1	346	C
Ablandadores de Agua Caldera 3	376	B	Bomba envío agua de fábrica 2	346	C
Ablandadores de Agua Caldera 4	376	B	Bomba envío agua producto 1	346	C
Desgasificador (Caldera 3)	246	C	Bomba envío agua producto 2	346	C
Desgasificador (Caldera 4)	246	C	Filtro de Carbon 1	346	C
Tanque Alimentación Caldera 3	336	C	Filtro de Carbon 2	346	C
Tanque Alimentación Caldera 4	336	C	Filtro de Carbon 3	346	C
Tanque principal de condensado	336	C	Cuadro de vapor sanitización de filtros	436	B
Tanque de purga de fondo caldera 3	336	C	Tamiz rotativo de equalizador	472	B
Compresor-UNION	550	A	Pozo laberinto de efluentes	550	A
Compresor-CO2-NEA	550	A	Tanque dosificación de quimicos HCl	326	C
Compresor-NH3-MYCOM	550	A	Tanque dosificación de quimicos soda	326	C
Torres Desodorizadoras CO2 (NEA)	410	B	Tanque Equalizador	326	C
Torres Desodorizadoras CO2 (Union)	410	B	Tanque neutralizador	326	C
Condensador de CO2xNH3 (NEA)	410	B	Tanque receptor efluente tratado	326	C
			Tanque de rechazo de tamiz	326	C

Tabla A-3: Bitácora de fallos del equipo crítico con los tiempos de detención asociados para el año 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Tiempo de falla [hr]	Fecha	Tiempo de falla [hr]	Fecha	Tiempo de falla [hr]
01-01-2019	0,0667	07-05-2019	1,20	06-09-2019	0,800
02-01-2019	0,367	10-05-2019	0,317	08-09-2019	0,467
05-01-2019	1,27	11-05-2019	0,217	12-09-2019	1,32
09-01-2019	0,0667	13-05-2019	0,317	16-09-2019	0,667
12-01-2019	0,0667	17-05-2019	0,367	19-09-2019	0,917
14-01-2019	30,0	21-05-2019	0,117	22-09-2019	0,883
15-01-2019	0,667	25-05-2019	0,467	23-09-2019	1,22
18-01-2019	0,167	29-05-2019	0,667	26-09-2019	0,267
20-01-2019	10,0	02-06-2019	0,117	28-09-2019	0,367
21-01-2019	0,733	05-06-2019	0,0667	30-09-2019	0,883
25-01-2019	1,32	09-06-2019	0,217	04-10-2019	0,067
26-01-2019	0,467	11-06-2019	1,97	07-10-2019	0,067
30-01-2019	0,700	14-06-2019	0,533	09-10-2019	0,217
31-01-2019	1,72	15-06-2019	0,167	10-10-2019	17,5
02-02-2019	0,217	16-06-2019	0,117	14-10-2019	0,167
04-02-2019	1,78	19-06-2019	1,12	16-10-2019	12,5
05-02-2019	1,53	22-06-2019	0,367	18-10-2019	0,417
07-02-2019	0,217	26-06-2019	0,367	20-10-2019	0,733
10-02-2019	0,367	28-06-2019	1,15	23-10-2019	0,817
11-02-2019	0,0667	29-06-2019	0,467	25-10-2019	0,367
13-02-2019	0,0667	02-07-2019	1,85	27-10-2019	0,967
16-02-2019	0,767	06-07-2019	0,167	29-10-2019	0,367
20-02-2019	0,567	07-07-2019	0,0667	30-10-2019	0,417
23-02-2019	1,15	09-07-2019	0,0167	31-10-2019	0,0667
24-02-2019	1,17	10-07-2019	0,967	01-11-2019	0,267
28-02-2019	0,167	14-07-2019	0,667	02-11-2019	0,317
04-03-2019	0,0667	15-07-2019	0,117	06-11-2019	0,417
05-03-2019	0,783	19-07-2019	0,367	09-11-2019	0,367
09-03-2019	0,367	22-07-2019	0,367	11-11-2019	0,467
11-03-2019	0,217	23-07-2019	0,367	12-11-2019	0,867
13-03-2019	0,417	24-07-2019	0,800	16-11-2019	0,467
17-03-2019	0,467	25-07-2019	0,217	19-11-2019	0,717
19-03-2019	0,317	26-07-2019	1,83	20-11-2019	0,0667
21-03-2019	0,550	30-07-2019	0,767	23-11-2019	0,267
25-03-2019	0,950	01-08-2019	0,167	26-11-2019	0,817
28-03-2019	25,0	03-08-2019	0,217	30-11-2019	0,417
30-03-2019	0,167	05-08-2019	0,267	02-12-2019	0,267
01-04-2019	0,933	08-08-2019	1,35	03-12-2019	0,0167
03-04-2019	12,5	10-08-2019	0,617	06-12-2019	0,567
05-04-2019	0,633	13-08-2019	0,317	08-12-2019	0,117
08-04-2019	0,267	15-08-2019	0,367	10-12-2019	1,92
12-04-2019	0,0167	16-08-2019	0,417	11-12-2019	1,55
15-04-2019	0,0167	19-08-2019	0,933	15-12-2019	1,23
16-04-2019	0,367	23-08-2019	0,317	16-12-2019	0,267
18-04-2019	0,900	24-08-2019	0,417	17-12-2019	0,317
22-04-2019	0,317	27-08-2019	0,267	19-12-2019	0,0667
26-04-2019	0,850	29-08-2019	0,167	23-12-2019	0,117
27-04-2019	0,217	31-08-2019	0,417	24-12-2019	0,217
29-04-2019	0,217	04-09-2019	1,87	26-12-2019	0,417
03-05-2019	1,08	05-09-2019	0,467	27-12-2019	1,65
				30-12-2019	0,0667

Tabla A-4: Resultados de las pruebas de bondad de Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling. Obtención de (*) y (**) detallada en el Anexo B.

Fuente: Elaboración propia.

Test	Estadístico de contraste	Valor crítico	Criterio para aceptar H_0	Resultado
K-S	$D^* = 0,277$	$D_\alpha = 0,140$	$D \leq D_\alpha$	NO se acepta
A-D	$A^{2**} = 3,158$	$A_c = 0,752$	$A^2 \leq A_c$	NO se acepta

Tabla A-5: Datos de regresión lineal para estimación de parámetros de Weibull.

Fuente: Elaboración propia.

Orden (i)	Tiempo entre fallas semanal [hr]	W_{α} [F(t)]	X_i [$\ln(t-\hat{\theta})$]	Y_i [$\ln[\ln(1/(1-F(t)))]$]
1	31,8	0,01299	0,64	-4,34
2	32,9	0,03147	1,09	-3,44
3	33,3	0,05013	1,23	-2,97
4	38,5	0,06885	2,16	-2,64
5	41,0	0,08757	2,41	-2,39
6	41,1	0,10631	2,42	-2,19
7	41,3	0,12505	2,43	-2,01
8	41,8	0,14379	2,47	-1,86
9	41,8	0,16254	2,47	-1,73
10	47,3	0,18128	2,86	-1,61
11	50,1	0,20003	3,00	-1,50
12	51,3	0,21877	3,06	-1,40
13	55,0	0,23752	3,22	-1,30
14	55,1	0,25627	3,23	-1,22
15	55,2	0,27502	3,23	-1,13
16	55,2	0,29377	3,23	-1,06
17	55,3	0,31251	3,23	-0,98
18	55,3	0,33126	3,23	-0,91
19	55,3	0,35001	3,23	-0,84
20	55,3	0,36876	3,24	-0,78
21	55,4	0,38751	3,24	-0,71
22	55,4	0,40626	3,24	-0,65
23	55,4	0,42500	3,24	-0,59
24	55,4	0,44375	3,24	-0,53
25	55,4	0,46250	3,24	-0,48
26	55,5	0,48125	3,24	-0,42
27	55,5	0,50000	3,24	-0,37
28	55,6	0,51875	3,25	-0,31
29	55,6	0,53750	3,25	-0,26
30	55,6	0,55625	3,25	-0,21
31	55,6	0,57500	3,25	-0,16
32	55,6	0,59374	3,25	-0,10
33	55,7	0,61249	3,25	-0,05
34	55,7	0,63124	3,25	-0,00
35	55,7	0,64999	3,25	0,05
36	55,7	0,66874	3,25	0,10
37	55,7	0,68749	3,25	0,15
38	83,3	0,70623	3,98	0,20
39	83,4	0,72498	3,98	0,26
40	83,4	0,74373	3,98	0,31
41	83,5	0,76248	3,98	0,36
42	83,6	0,78123	3,98	0,42
43	83,6	0,79997	3,98	0,48
44	83,6	0,81872	3,98	0,54
45	83,7	0,83746	3,98	0,60
46	83,7	0,85621	3,99	0,66
47	83,8	0,87495	3,99	0,73
48	83,9	0,89369	3,99	0,807
49	83,9	0,91243	3,99	0,890
50	83,9	0,93115	3,99	0,984
51	167	0,94987	4,92	1,096
52	168	0,96853	4,93	1,241
53	168	0,98701	4,93	1,469

Tabla A-6: Cuadro de descripción de cargo para el Coordinador de Servicios.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Coordinador de Servicios
ÁREA O UNIDAD	Servicios
SUPERIOR DIRECTO	Gerente de Elaboración y Servicios
REEMPLAZA A	Jefe de Servicios / Jefe de Efluentes
LO REEMPLAZA	Gerente de planta
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Ingeniero Mantenedor
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar el flujo de facilitadores de producción de la planta
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Planificación y control, e Ingeniería: Crear ficha de inicio
2	Autorizar flujos para compras de materiales e insumos
3	Presidir reunión diaria de control de producción
4	Liderar mejoramiento continuo del área
5	Liderar procesos de gestión del riesgo y mantenimiento
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de CO ₂ liberados a la atmósfera
	0 (cero) m ³ de efluentes derramados
	0 (cero) m ³ de amoníaco derramados
	0 (cero) m ³ de soda caustica derramados
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-7: Cuadro de descripción de cargo para el Jefe de Servicios.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Jefe de Servicios
ÁREA O UNIDAD	Servicios
SUPERIOR DIRECTO	Coordinador de Servicios
REEMPLAZA A	Dueño de aguas / Dueño de CO ₂ / Dueño de Vapor / Dueño de NH ₃
LO REEMPLAZA	Coordinador de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Técnico Mecánico / Técnico Mantenedor
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar el flujo de facilitadores de producción de la planta
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Planificación y control, e Ingeniería: Crear ficha de inicio
2	Presidir reunión diaria de control de producción
3	Reportar intervenciones de equipo, preventivas y correctivas
4	Realizar chequeos rutinarios en equipos del área
5	Supervisar actividades de mantenimiento
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Mantenimiento	0 (cero) fallas catastróficas en equipos críticos
	100% de disponibilidad de los equipos de servicios
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de CO ₂ liberados a la atmósfera
	0 (cero) m ³ de efluentes derramados
	0 (cero) m ³ de amoniaco liberados a la atmósfera
	0 (cero) m ³ de soda caustica derramados
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-8: Cuadro de descripción de cargo para el Jefe de Efluentes.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Jefe de Efluentes
ÁREA O UNIDAD	Servicios / Efluentes
SUPERIOR DIRECTO	Coordinador de Servicios
REEMPLAZA A	-
LO REEMPLAZA	Coordinador de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Ingeniero hidráulico / Ingeniero Ambiental
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Controlar el flujo y tratamiento de efluentes generados por el proceso de producción
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Control y tratamiento de efluentes
2	Presidir reunión diaria de control de producción
3	Reportar intervenciones de equipos, preventivas y correctivas
4	Comunicar irregularidades de control de calidad de efluentes (concentración de sólidos y pH de efluentes)
5	Gestionar retiro de efluentes tratados a planta de tratamiento
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Operaciones	0 (cero) horas perdidas por detención de planta de tratamiento
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de efluentes derramados
	0 (cero) m ³ de ácido clorhídrico derramados
	0 (cero) m ³ de soda caustica derramados
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-9: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de Aguas.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Dueño de aguas
ÁREA O UNIDAD	Servicios / Planta de tratamiento de agua
SUPERIOR DIRECTO	Coordinador de servicios
REEMPLAZA A	-
LO REEMPLAZA	Jefe de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Ingeniero Hidráulico
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar el flujo y tratamiento de las aguas que entran a producción y consumo de la planta.
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Control de suministro y tratamiento de aguas
2	Reportar intervenciones de equipos, preventivas y correctivas
3	Reportar fallas y mantener funcionalidad de los sistemas de tratamiento
4	Realizar inspecciones rutinarias en equipos
5	Participar en los procesos de mejora
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de CO ₂ liberados a la atmósfera
	0 (cero) m ³ de soda caustica derramados
Operaciones	0 (cero) horas de trabajo perdidas por falta de suministro de agua
	Calidad de agua tratada dentro de estándares
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-10: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de CO₂.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Dueño de CO ₂
ÁREA O UNIDAD	Servicios / Captación y tratamiento de CO ₂
SUPERIOR DIRECTO	Jefe de servicios
REEMPLAZA A	-
LO REEMPLAZA	Jefe de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Ingeniero Mantenedor
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar la captación y tratamiento de gas carbónico de producción
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Mantener operativo el proceso de captación y tratamiento de CO₂
2	Notificar irregularidades en el volumen de CO ₂ almacenado
3	Asegurar calidad de CO ₂ captado
4	Notificar intervenciones a equipos, preventivas y correctivas
5	Participar en procesos de mejora
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Operaciones	0 (cero) horas de trabajo perdidas por falta de suministro de CO ₂
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de CO ₂ liberados a la atmósfera
	0 (cero) m ³ de amoníaco liberados a la atmósfera
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-11: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de Vapor.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Dueño de vapor
ÁREA O UNIDAD	Servicios / Generación de Vapor
SUPERIOR DIRECTO	Jefe de Servicios
REEMPLAZA A	-
LO REEMPLAZA	Jefe de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Mantenedor / Técnico o Especialista en calderas
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar la generación y suministro de vapor a la planta de producción
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Control de suministro de vapor
2	Reportar intervención de equipos, preventivas y correctivas
3	Reportar fallas y mantener funcionalidad de los sistemas de generación
4	Realizar inspecciones rutinarias en equipos
5	Participar en los procesos de mejora
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Medio ambiente	Emisiones de combustión dentro de estándares
Operaciones	0 (cero) horas de trabajo perdidas por falta de suministro de vapor
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

Tabla A-12: Cuadro de descripción de cargo para el Dueño de NH₃.

Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DEL CARGO	
NOMBRE DEL CARGO	Dueño de NH ₃
ÁREA O UNIDAD	Servicios / Generación de frío
SUPERIOR DIRECTO	Jefe de Servicios
REEMPLAZA A	-
LO REEMPLAZA	Jefe de Servicios
FORMACIÓN RECOMENDADA	Ingeniero Mecánico / Mantenedor
FUNCIÓN GENERAL DEL CARGO	Gestionar el flujo y suministro de etanol enfriado a producción
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES	
1	Controlar el suministro de líquido refrigerante a fermentación
2	Reportar intervenciones de equipos, preventivas y correctivas
3	Reportar fallas y mantener funcionalidad de los sistemas de enfriamiento
4	Realizar inspecciones rutinarias en equipos
5	Participar en los procesos de mejora
MÉTRICAS DEL CARGO	
Seguridad	0 (cero) accidentes bajo su cargo
Medio ambiente	0 (cero) m ³ de amoniaco derramados
	0 (cero) m ³ de etanol derramados
Operaciones	0 (cero) horas de trabajo perdidas por falta de flujo de líquido refrigerante
COMPETENCIAS DEL CARGO	
Confianza en sí mismo	Capacidad de asumir riesgos y responsabilidades
Gestión del estrés	Eficiencia en multitarea, pese a la presión
Asertividad	Recrimina conductas negativas cuando sea necesario, sin agresividad, pero firme
Orientación a resultados	Exigencia para con los resultados
Responsabilidad	Alta disponibilidad para compromisos y responsabilidades. Reflexiona con claridad las consecuencias de sus actos y actúa acorde
Resolución de problemas	Aprovechamiento de recursos necesarios para encontrar alternativas y probarlas para llegar a una solución
Flexibilidad	Motor de cambio para nuevos roles, normas, etc.
Liderazgo	Delega responsabilidades considerando fortalezas y debilidades.
Influencia	Comunicación con convicción e imposición de respeto
Resolución de conflictos	Interés por entender los puntos de vista de los otros
Desarrollo de otros	Capacidad de identificar talento y promover la innovación

B. Fórmulas

Confiabilidad

Dado:

$$f(t) = \frac{\beta(t - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right]$$

Se define la función de confiabilidad como:

$$R(t) = \int_t^\infty f(s) ds = \int_t^\infty \frac{\beta(s - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \cdot \exp \left[- \left(\frac{s - \delta}{\theta} \right)^\beta \right] ds$$

Por lo tanto:

$$\boxed{R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right]}$$

Deducción de la regresión lineal

A partir de la definición de la función acumulativa de Weibull:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right]$$

Se despeja la componente exponencial, dejando:

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp \left[\left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right]$$

Se aplica el logaritmo natural:

$$\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) = \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta$$

Se repite el paso anterior:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \cdot \ln \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)$$

↔

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \cdot \ln(t - \delta) - \beta \cdot \ln(\theta)$$

Ecuación B-1: Regresión lineal de la función de distribución acumulativa.

Fuente: [7]

La ecuación anterior posee el mismo comportamiento que una ecuación de la recta de la forma; $y = m \cdot x + b$ de modo que se tiene que la pendiente de la recta corresponde al parámetro de forma (β), mientras que el parámetro de escala queda definido como:

$$\theta = e^{-\frac{b}{\beta}}$$

Ecuación B-2: Definición del parámetro de escala mediante regresión lineal.

Fuente: [7]

Rango de mediana

Al no disponer directamente de los parámetros de la distribución de Weibull, no resulta evidente poder calcular los valores del lado izquierdo de la **Ecuación B-1**, es por esto por lo que debe de utilizar un estimador de la función acumulativa llamado *Rango de mediana*, el cual lleva la siguiente definición.

$$W_{\alpha}(X_i) = \frac{\frac{i}{n - i + 1}}{F_{1-\alpha, 2(n-i+1), 2i} + \frac{i}{n - i + 1}}$$

Ecuación B-3: Rango de mediana para nivel de confianza $1 - \alpha$ (con $\alpha = 0,5$) y de parámetros; i (orden de falla), n (número de datos), F (distribución de Fischer).

Fuente: [7].

Este valor de W_{α} estará asociado a cada uno de los datos de MTBF estimados y será utilizado como estimador de $F(t)$ para los cálculos de la regresión lineal.

Prueba de bondad de ajuste Kolmogórov-Smirnov

Para probar que la data mostrada en la **Tabla A-3** sigue una distribución del tipo Weibull de tres parámetros (β, δ, θ) se emplearon dos pruebas de bondad de ajuste, el primero es el de Kolmogórov-Smirnov, el cual hace uso de un

estadístico de contraste (D) para probar la hipótesis nula, que afirma que la data sigue una distribución dada. Este estadístico de contraste se define como:

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} \{|\hat{F}_n(x_i) - F_0(x_i)|\}$$

Ecuación B-4: Estadístico de contraste para prueba de bondad Kolmogórov-Smirnov donde \hat{F}_n es el valor de la función de densidad del estimador observado de la distribución y F_0 , el valor aceptando H_0 .

Fuente: [15].

Este parámetro D recibe el nombre de *estadístico de contraste* porque debe compararse con un valor crítico determinado definido como:

$$D_\alpha = \frac{C_\alpha}{k(n)}$$

Ecuación B-5: Valor crítico para comparación donde C_α viene entregado por tabla y $k(n)$ para una distribución Weibull se obtiene como \sqrt{n} .

Fuente: [15].

Es así como con $C_\alpha = 0,988$ (para $n = 50$ y significancia $\alpha = 0,01$), entregado por Chakravarty et al. (1967) se llega a que el valor crítico para Kolmogórov-Smirnov es $D_\alpha = 0,140$.

Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling

De forma similar a la prueba de Kolmogórov-Smirnov, la prueba de A-D utiliza un estadístico de contraste para probar la hipótesis nula de que un conjunto de datos sigue una distribución determinada. Este estadístico se define como:

$$A^2 = -N - S$$

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{2i-1}{N} [\ln(F_0(x_i)) + \ln(1 - F_0(x_{N+1-i}))]$$

Ecuación B-6: Estadístico de contraste para la prueba de bondad de ajuste Anderson Darling, para un orden de N datos y F_0 el valor de la función de densidad de la distribución asumiendo H_0 .

Fuente: [16].

Al igual que en la prueba K-S, los valores críticos para comparar vienen dados dependiendo de la cantidad de datos y la distribución que se quiere probar. Así, Stephens (1974) entrega (para una significancia $\alpha = 0,01$ y $n = 50$) un valor de $A_c = 0,752$.

Referencias

- [1] TurMec.
- [2] N. Álvarez, «Conceptos de mejora continua,» de *Curso Fundamentos del mejoramiento continuo*, 2018.
- [3] H. Gutiérrez y R. de la Varas, *Control estadístico de calidad y seis sigma*, 2009.
- [4] A. Salgueiro, *Indicadores de gestión y cuadro de mando*, 2001.
- [5] British Standards Institution, *BS ISO 31000:2018 - Principles and Guidelines*, 2018.
- [6] T. Agustiady y E. Cudney, *Total Productive Maintenance*, 2015.
- [7] B. Dodson, *The Weibull Analysis Handbook*, 2006.
- [8] Society of Automotive Engineers, *SAE JA1011:2009 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*, 2009.
- [9] Society of Automotive Engineers, *SAE JA1012:2002 - A guide to the reliability centered maintenance (RCM) standard*, 2002.
- [10] Mycom.
- [11] Bosch.
- [12] Dantechique.
- [13] T. Grubessich, «RCM: Políticas de mantenimiento,» de *"Curso Ingeniería de Plantas Industriales"*, 2019.
- [14] Dun & Bradstreet, «eInforma,» CESCE, 2018. [En línea]. Available: <http://www.einforma.com>. [Último acceso: 2020].
- [15] I. M. Chakravarty, R. G. Laha y J. Roy, *Handbook of methods of applied statistics, Volume I*, 1967.

- [16] M. A. Stephens, «EDF statistics for goodness of fit and some comparisons,»
Journal of the American statistical Association, vol. LXIX, n° 347, 1974.