

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA



**CÁTALOGO DE FALLAS BASADO EN LA NORMA ISO  
14224 PARA UN SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA  
EMPRESA FARMACÉUTICA**

TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

**Alumno:** Diego Pablo Castillo Rojas

**Profesor guía:** Mg. Ing. Ricardo Ciudad Cartagena



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** CÁTALOGO DE FALLAS BASADO EN LA NORMA ISO 14224 PARA UN SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA EMPRESA FARMACÉUTICA

**Nombre del candidato(a):** DIEGO PABLO CASTILLO ROJAS

**Carrera / Grado:** INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL/ LICENCIADO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**Campus:** SEDE VIÑA DEL MAR **Departamento:** MECÁNICA

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, RICARDO JAVIER CIUDAD CARTAGENA, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 20-04-2026

**Firma:** 

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 20-04-2026

**Firma:** 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en el contexto de una empresa farmacéutica dedicada a la elaboración de productos a base de extractos naturales, en la cual el sistema de purificación de agua cumple un rol clave dentro del proceso productivo, al estar presente en la totalidad de las etapas de elaboración. Este sistema, basado en tecnología de ósmosis inversa, requiere altos estándares de calidad y continuidad operacional, lo que hace indispensable una adecuada gestión del mantenimiento de sus equipos y componentes.

Bajo este enfoque, el presente trabajo aborda la problemática asociada a la ausencia de un método estandarizado para el registro y análisis de fallas en un sistema de purificación de agua, lo cual limita la capacidad de identificar tendencias y optimizar el plan de mantenimiento. En este contexto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un catálogo de fallas basado en la norma ISO 14224 para un sistema de ósmosis inversa, con la finalidad de mejorar la trazabilidad de la información y reducir los tiempos de diagnóstico y reparación. Bajo esta premisa, se realizó un análisis de la normativa, un levantamiento de información técnico-operativa, una jerarquización de los equipos e ítems mantenibles y el diseño de un formato de registro de fallas. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación técnico-operativa basada en escenarios estimados, considerando el tiempo de diagnóstico, reparación y disponibilidad de repuestos. En consecuencia, los resultados evidencian un potencial de reducción en los tiempos de diagnóstico y una mejora en la gestión de la información, permitiendo establecer una base de datos estructurada para el análisis de tendencias. Finalmente, se concluye que la implementación del catálogo de fallas se establece como una herramienta efectiva para fortalecer la gestión del mantenimiento y apoyar la toma de decisiones en sistemas de alto impacto operativo.

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	2
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
3	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	4
4	OBJETIVO GENERAL.....	5
4.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
5	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	6
5.1	IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS .....	6
5.1.1	<i>Análisis documental y adaptación de la norma ISO 14224</i> .....	6
5.1.2	<i>Levantamiento de información técnica-operativa</i> .....	7
5.1.3	<i>Representación del sistema</i> .....	8
5.2	DESARROLLO DEL CATÁLOGO DE FALLAS.....	9
5.2.1	<i>Aplicación de la taxonomía ISO 14224 al sistema de purificación de agua</i> .....	9
5.2.2	<i>Definición del formato y estructura del catálogo de fallas</i> .....	10
5.3	APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CATÁLOGO .....	10
5.3.1	<i>Levantamiento de información para el análisis técnico-operacional</i> .....	10
5.3.2	<i>Análisis técnico-operacional de la implementación del catálogo de fallas</i> .....	11
5.3.3	<i>Evaluación de resultados y formulación de conclusiones</i> .....	12
6	MARCO TEÓRICO.....	13
6.1	MANTENIMIENTO .....	13
6.1.1	MANTENIMIENTO CORRECTIVO (ACCIÓN REACTIVA) .....	14
6.1.2	MANTENIMIENTO PREVENTIVO (ACCIÓN PROACTIVA) .....	14
6.1.3	MANTENIMIENTO PREDICTIVO (ACCIÓN PROACTIVA) .....	15
6.1.4	INDICADORES DE MANTENIMIENTO .....	16
6.1.5	PERDIDAS DE PRODUCTIVIDAD.....	18
6.1.6	IMPACTO DE REPUESTOS .....	19
6.2	NORMA ISO 14224.....	19
6.2.1	CATÁLOGO DE FALLAS.....	21
6.3	ÓSMOSIS INVERSA .....	27
7	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE AGUA .....	29
7.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA .....	29

7.2	<b>FLUJO DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN</b> .....	31
7.3	<b>ETAPA DE PRETRATAMIENTO</b> .....	33
7.3.1	<b>Descripción de componentes del sistema de pretratamiento</b> .....	34
7.4	<b>ETAPA DE GENERACIÓN OSMOSIS INVERSA</b> .....	37
7.4.1	<b>Descripción de componentes del sistema de generación (OI)</b> .....	39
7.5	<b>ETAPA DE ALMACENAMIENTO DISTRIBUCIÓN</b> .....	41
7.5.1	<b>Descripción de componentes del sistema de distribución</b> .....	42
8	<b>CATÁLOGOS DE FALLAS</b> .....	45
8.1	<b>Introducción al catálogo de fallas</b> .....	45
8.2	<b>MUESTRA DE CATÁLOGOS DE FALLA</b> .....	46
8.2.1	<b>Bomba centrífuga de pretratamiento BC-01</b> .....	46
8.3	<b>EJEMPLO HOJA DE REGISTRO</b> .....	47
8.3.1	<b>Hoja de registro de fallas</b> .....	48
9	<b>EVALUACIÓN TÉCNICO-OPERATIVA</b> .....	49
9.1	<b>Introducción a evaluación operativa</b> .....	49
9.2	<b>Levantamiento de información y supuestos</b> .....	50
9.3	<b>Consideración coeficiente de reducción “r”</b> .....	52
9.4	<b>Metas de producción</b> .....	54
9.5	<b>Perdidas de producción por falla</b> .....	54
9.6	<b>Evaluación de impacto productivo</b> .....	55
9.7	<b>Análisis de sensibilidad</b> .....	57
10	<b>CONCLUSIONES</b> .....	58
10.1	<b>CONCLUSIONES PRINCIPALES</b> .....	58
10.2	<b>CONCLUSIONES ESPECIFICAS</b> .....	59
11	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	60
12	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	61
13	<b>ANEXOS</b> .....	62
13.1	<b>Filtro multimedia</b> .....	62
13.2	<b>Ablandadores</b> .....	62
13.3	<b>Bomba dosificadora</b> .....	63
13.4	<b>Tanque de estabilización</b> .....	63
13.5	<b>Filtro de cartucho</b> .....	64
13.6	<b>Válvula actuada neumática</b> .....	64
13.7	<b>Lampara UV</b> .....	65

<b>13.8</b>	<b>Bomba de alta presión</b> .....	<b>65</b>
<b>13.9</b>	<b>Válvula esférica</b> .....	<b>66</b>
<b>13.10</b>	<b>Módulo de osmosis inversa</b> .....	<b>66</b>
<b>13.11</b>	<b>Módulo EDI</b> .....	<b>66</b>
<b>13.12</b>	<b>Válvula de diafragma manual</b> .....	<b>67</b>
<b>13.13</b>	<b>Válvula de diafragma actuada</b> .....	<b>67</b>
<b>13.14</b>	<b>Tanque de almacenamiento</b> .....	<b>68</b>
<b>13.15</b>	<b>Bomba centrífuga de distribución</b> .....	<b>68</b>
<b>13.16</b>	<b>Intercambiador de calor</b> .....	<b>69</b>
<b>13.17</b>	<b>Lampara UV distribución</b> .....	<b>69</b>
<b>13.18</b>	<b>Válvula actuada neumática</b> .....	<b>70</b>
<b>13.19</b>	<b>Línea de distribución</b> .....	<b>70</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Subdivisión de ítems mantenibles para bombas.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. Familia de equipos rotativos y sus modos de falla .....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 3. Grupos asociados a causas de falla.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 4. Actividades recomendadas de mantenimiento .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 5. Índice de catálogo de fallas .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 6. Catálogo bomba centrífuga BC-01 .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 7. Hoja de registro de fallas.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 8. Entrevista operador.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 9. Factor de reducción r.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 10. Situación actual.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 11. Situación propuesta.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 12. Metas de producción .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 13. Pérdidas de producción situación base.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 14. Pérdidas de producción situación propuesta .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 15. Diferencial de productos entre situación actual y caso propuesto .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 16. Impacto en indisponibilidad por repuestos.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 17. Análisis de sensibilidad para factor de reducción.....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 18. Catálogo filtro multimedia.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 19. Ablandadores .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 20. Bombas dosificadoras .....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 21. Tanque de estabilización.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 22. Filtro de cartucho .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 23. Válvula actuada neumática.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 24. Lámpara UV .....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 25. Bomba de alta presión.....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 26. Válvula esférica .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 27. Módulo de ósmosis inversa .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 28. Módulo EDI .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 29. Válvula de diafragma manual.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 30. Válvula de diafragma actuada .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 31. Tanque de almacenamiento.....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 32. Bomba centrífuga de distribución .....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 33. Intercambiador de calor .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 34. Lámpara UV distribución.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 35. Válvula actuada neumática.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 36. Línea de distribución .....</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1: Curva P-F. Intervalo de inspección (<math>\Delta T</math>) establecido para detectar una falla potencial antes de que ocurra la falla funcional. ....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2: Pirámide taxonómica de jerarquía de los equipos.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3: Explicación del principio de ósmosis.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 4: Explicación del principio de ósmosis inversa. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5: Sistema de purificación de agua.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 6: Diagrama del sistema de purificación de agua.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 7: Diagrama del sistema de pretratamiento. ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 8: Bomba Centrífuga pretratamiento. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9: Filtro multimedia y ablandadores. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 10: Bombas dosificadoras y filtro de cartucho.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 11: Diagrama del sistema de generación (OI). ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 12: Sistema de generación (OI) vista (1). ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 13: Diagrama del sistema de distribución. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 14: Tanque de almacenamiento.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 15: Intercambiador de calor y lampara UV.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 16: Bomba centrífuga de distribución.....</b>	<b>44</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

En la industria farmacéutica, la gestión del mantenimiento y una adecuada preparación frente a los fallos imprevistos presentan un rol fundamental, debido a las altas exigencias de calidad y continuidad operacional. Los sistemas involucrados en la fabricación de medicamentos deben asegurar un funcionamiento preciso y estable, además de condiciones sanitarias impolutas para asegurar la integridad del producto final.

En consideración de lo anterior, desarrollar estrategias de mantenimientos centradas en la confiabilidad permite reducir los tiempos fuera de servicio, mejorando de esta forma la disponibilidad operativa de los equipos. Mediante la implementación de una metodología de estandarización como es la norma ISO14224, se garantiza tomar decisiones más precisas y en un menor tiempo siendo su enfoque principal en la trazabilidad y orden de la información.

El trabajo se desarrolla en la empresa farmacéutica Knop S.A., ubicada en la comuna de Quilpué, enfocada en la producción de medicamentos y otros productos bajo los estrictos estándares solicitados por este tipo de industrias. Indagando en sus procesos, se evidencia que el sistema de purificación de agua pertenece a los activos con mayor impacto y participación dentro de la línea productiva. Mediante el proceso de ósmosis inversa, se encarga de proveer el agua de calidad farmacéutica utilizada como materia prima en diversos medicamentos, convirtiéndolo en un activo de alta criticidad sobre el que vale la pena trabajar.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la industria farmacéutica, los sistemas utilizados para el purificado de agua realizan una labor fundamental dentro del proceso productivo, ya que, sin una calidad de agua adecuada y acorde a la normativa internacional vigente, se genera un impacto directo en la producción, debido a que este elemento representa una materia prima esencial para la fabricación de medicamentos. En la empresa Knop S.A., actualmente no existe un sistema estandarizado para el registro y análisis de fallas, lo cual limita la posibilidad de identificar tendencias o realizar análisis más profundos sobre las fallas que presenta un activo de alta importancia operacional.

Esta situación repercute tanto en la ejecución del mantenimiento correctivo como en la planificación del mantenimiento preventivo. La ausencia de un registro sistematizado de fallas obliga a los mantenedores a basarse principalmente en sus conocimientos y experiencias individuales para identificar las posibles causas de los eventos, lo que prolonga los tiempos de diagnóstico y reparación. Además, la falta de información histórica sobre la frecuencia y el tipo de fallas dificulta la programación de actividades preventivas enfocadas en los componentes más críticos del sistema.

En consecuencia, los tiempos necesarios para que el equipo recupere su función aumentan, afectando negativamente indicadores de mantenimiento como el tiempo medio de reparación (MTTR) y reduciendo la disponibilidad del sistema. Esta situación impacta directamente la continuidad operativa del proceso productivo, al tratarse de un sistema que participa en la totalidad de las etapas de producción

### **3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

La ausencia de un método estructurado para el registro y análisis de fallas genera una limitación importante en la gestión del mantenimiento, debido a que impide disponer de información confiable y estandarizada para la toma de decisiones técnicas. En este contexto, se hace necesario implementar una herramienta que permita organizar la información asociada al comportamiento de los equipos, facilitando la identificación de patrones de falla y la optimización de los tiempos de respuesta ante eventos no deseados.

El desarrollo de un catálogo de fallas basado en la norma ISO 14224 permite estandarizar la recopilación, clasificación y análisis de la información asociada a las fallas del sistema de purificación de agua. Esta estandarización se enfoca en mejorar la trazabilidad de los eventos de mantenimiento y proporciona una base de datos que permite orientar los recursos hacia los componentes de mayor criticidad.

Desde un punto de vista operacional, la implementación de un catálogo de fallas permite reducir la incertidumbre en el proceso de diagnóstico, facilitando la identificación de posibles causas y acciones de mantenimiento asociadas a cada evento. Esto contribuye a disminuir los tiempos de inactividad del sistema y mejorar su disponibilidad, impactando positivamente en la continuidad del proceso productivo.

De esta forma, la implementación de un catálogo de fallas realiza un aporte a la gestión del mantenimiento del sistema de ósmosis inversa, permitiendo mejorar la calidad de la información disponible y establecer una base sólida para futuros análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

## **4 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un catálogo de fallas basado en la norma ISO 14224 para el sistema de ósmosis inversa de la empresa Knop S.A., con el propósito de estandarizar el registro y análisis de fallas, mejorar la trazabilidad de los datos y reducir los tiempos medios de reparación, permitiendo realizar un análisis técnico-operacional.

### **4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los equipos del sistema de purificación de agua mediante levantamiento técnico-operativo, para establecer la base estructural del catálogo de fallas.
- Desarrollar un catálogo de fallas y una hoja de registro basados en la norma ISO 14224, mediante la clasificación de ítems mantenibles, modos y causas de falla, para estandarizar el registro de información.
- Evaluar el impacto del catálogo de fallas en la gestión del mantenimiento, mediante un análisis técnico-operacional de tiempos de diagnóstico y reparación, para determinar mejoras en la disponibilidad del sistema.

## **5 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

EL presente capítulo tiene por objetivo describir la metodología de trabajo, la cual se compone por tres etapas, orientadas al cumplimiento de los objetivos específicos. En cada etapa se definen los procedimientos necesarios para la identificación de los equipos, la elaboración del catálogo de fallas y su aplicación y evaluación en el sistema de ósmosis inversa. Esta metodología se basa en los lineamientos de la norma ISO 14224 (British Standards Institution, 2016), con el fin de asegurar la estandarización del registro de fallas, la trazabilidad de la información y las mejoras observables del análisis técnico-operativo.

### **5.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS**

#### ***5.1.1 Análisis documental y adaptación de la norma ISO 14224***

Para comenzar con el desarrollo del trabajo de título, el primer paso consistió en la obtención del documento normativo ISO 14224, el cual fue facilitado por el profesor guía. Debido a que dicho documento se encuentra orientado principalmente a la industria del petróleo y petroquímica, se realizó una revisión detallada con el fin de extraer los elementos esenciales que permitieran su adaptación al contexto de la industria farmacéutica.

Una vez finalizada la lectura del documento normativo, se identificó que su principal enfoque se centra en la recolección de datos y en la clasificación de la información asociada al mantenimiento y la confiabilidad de los equipos. A partir de esta revisión, se corroboró la utilidad del documento como base para la creación de un catálogo de fallas y para el desarrollo de una estructura de registro de información.

Posteriormente, luego de comprender los lineamientos establecidos en la norma ISO14224 (British Standards Institution, 2016), se identificó como elemento principal la estructura jerárquica utilizada para la clasificación de los equipos. En el desarrollo de un catálogo de fallas, primero se definió qué se entiende por catálogo de fallas según el documento normativo, junto con sus componentes y la información del sistema requerida para su correcta elaboración.

Como primer punto del análisis, se identificó la pirámide taxonómica de los equipos, la cual constituye el punto de partida para la implementación de la normativa en el desarrollo del catálogo de fallas. Con base en lo anterior, el sistema de purificación de agua fue seccionado en niveles jerárquicos correspondientes a sistema, equipos, componentes e ítems mantenibles. En la sección de ítems mantenibles se utilizó la normativa como guía para definir los componentes del sistema según correspondiera. Luego se evaluaron los modos de falla disponibles, los cuales se seleccionaron según la familia a la que pertenece cada equipo, ya sea rotativo, mecánico, eléctrico o de seguridad y control. Una vez definido el modo de falla, se asignó una causa, la cual fue registrada en la hoja correspondiente junto con la acción ejecutada para recuperar la función perdida del equipo. De esta forma, se abordaron los elementos esenciales que debe contener un catálogo de fallas completo.

Finalmente, se estableció un método de registro para las fallas definidas en el catálogo, con el objetivo de que estas pudieran ser analizadas posteriormente, permitiendo identificar tendencias y anticiparse a problemas crónicos que no siempre resultan evidentes a simple vista. Con base en la información disponible en la norma, que detalla los datos esenciales que debe contener una hoja de registro, se diseñó un formato que permite identificar la causa de la falla y los tiempos asociados al proceso de reparación, considerando desde el momento de ocurrencia del evento hasta la llegada de repuestos y la recuperación de la función del equipo.

### ***5.1.2 Levantamiento de información técnica-operativa***

Con la estructura normativa consolidada y definidos los antecedentes requeridos para completar el catálogo, se realizó el levantamiento de información técnico-operativa mediante dos visitas técnicas a la planta.

La primera visita fue realizada junto al profesor guía, la jefa de sustentabilidad y eficiencia de la empresa, otra tesista cuyo trabajo se relaciona con la eficiencia hídrica y la recuperación de agua, y el operador del equipo de ósmosis inversa. Durante esta instancia se ingresó a la sala de purificación de agua y se efectuó un recorrido guiado por las instalaciones. El operador explicó el funcionamiento general del sistema, los mantenimientos preventivos que realiza de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, así como la función y

criticidad del activo dentro de la empresa. Esta información fue obtenida mediante una charla guiada en terreno. Adicionalmente, durante la visita se conocieron los laboratorios donde se realizan los extractos de plantas y hierbas utilizados en los productos de la empresa, lo que permitió comprender la relevancia del sistema de purificación de agua dentro del proceso productivo.

Posteriormente, se coordinó una segunda visita técnica entre el operador del equipo de ósmosis inversa y la otra tesista, con el objetivo de aclarar dudas relacionadas con el funcionamiento de algunos componentes del sistema. En esta instancia se obtuvo información sobre fallas recurrentes, disponibilidad de repuestos y tiempos estimados de respuesta entre la ocurrencia de una falla y su reparación.

De forma complementaria a la información obtenida en terreno, se recurrió al área de mantenimiento de la planta con el fin de solicitar el manual del equipo de ósmosis inversa correspondiente al modelo IPA 2. Este documento contiene el detalle de los componentes del sistema y su documentación asociada, lo cual resultó de utilidad para identificar los equipos específicos utilizados en el sistema de purificación de agua y para la posterior definición y selección de los ítems mantenibles correspondientes a cada equipo.

### ***5.1.3 Representación del sistema***

Luego de las visitas realizadas a los laboratorios y a la sala de purificación de agua, acompañadas por la instrucción del operador del sistema, se procedió a realizar una representación del sistema de purificación de agua. En esta representación se identificaron los distintos activos junto con su código correspondiente, según la etapa del proceso a la cual pertenecen. Para la elaboración de esta representación se utilizó como guía la pantalla de monitoreo del sistema, junto con la información proporcionada por el operador del equipo y el área de mantenimiento de la planta. Además, se empleó la aplicación Lucid Software para el diseño de los diagramas de bloques. Como resultado de este proceso, se elaboraron cuatro diagramas de bloques. El primero representa las etapas que componen el sistema de purificación de agua, mientras que los tres restantes detallan los equipos involucrados en cada una de las etapas del proceso.

Estos diagramas permiten representar de manera clara la secuencia operativa del sistema, así como la interacción entre los distintos subsistemas identificados. De esta forma, facilitan la comprensión general del proceso y sirven como base para la posterior estructuración jerárquica del catálogo de fallas.

## **5.2 DESARROLLO DEL CATÁLOGO DE FALLAS**

### ***5.2.1 Aplicación de la taxonomía ISO 14224 al sistema de purificación de agua***

Una vez identificados los componentes y equipos que constituyen el sistema, se procedió al desarrollo del catálogo de fallas mediante la asignación de los niveles taxonómicos establecidos por la normativa. Tal como se indicó durante el levantamiento de información, el documento normativo establece que el sistema debe dividirse según su estructura jerárquica correspondiente.

Este proceso comenzó desde el nivel más general, correspondiente al nivel cinco, en el cual se identificó el sistema de purificación de agua. Posteriormente, en el nivel seis se definieron los procesos que conforman dicho sistema. Luego, en el nivel siete se identificaron los equipos involucrados en cada uno de los procesos del sistema. Finalmente, en el nivel ocho se establecieron los ítems mantenibles asociados a cada equipo presente en las distintas etapas del proceso (British Standards Institution, 2016).

El desarrollo de los ítems mantenibles para cada componente del sistema correspondió a la etapa más compleja del proceso. Esta actividad se realizó siguiendo el orden definido en los diagramas de bloques elaborados previamente. De acuerdo con la posición que ocupa cada componente dentro del flujo del proceso, se buscó dicho elemento en el catálogo del equipo correspondiente. De esta forma fue posible identificar sus ítems mantenibles asociados.

Una vez definidos los ítems mantenibles y comprendido el funcionamiento de cada componente, se identificaron los posibles modos de falla a los que cada uno puede estar expuesto. Posteriormente, se asignó una solución genérica de acuerdo con lo establecido por la normativa. La acción específica recomendada para recuperar la función del equipo debe ser completada por el técnico encargado una vez realizada la intervención de mantenimiento.

### ***5.2.2 Definición del formato y estructura del catálogo de fallas***

Una vez establecidos los niveles jerárquicos de los equipos y componentes, se procedió a registrar esta información en un formato que permitiera identificar claramente el orden definido. Con este propósito, se diseñó un documento en Excel que facilitó la visualización de dicha estructura. En este documento se elaboró la estructura de los catálogos de fallas para cada uno de los equipos involucrados en el proceso. En cada catálogo se registró el código del equipo, el ítem mantenible identificado a partir del manual del fabricante y, tal como se mencionó en el análisis documental, los modos de falla asociados a cada equipo según la familia a la que pertenecen, junto con una posible solución general.

Posteriormente, como complemento del catálogo de fallas, se desarrolló la hoja de registro. Para su elaboración se extrajeron los datos esenciales establecidos por la norma ISO 14224 para el registro de fallas. Esta información permite generar un historial de eventos que facilita el análisis de tendencias de ocurrencia y el cálculo de indicadores de mantenimiento, como el tiempo medio de reparación de fallas, entre otros.

La estructura desarrollada permitió establecer un formato estandarizado para la recopilación y organización de la información asociada a las fallas de los equipos, facilitando tanto el registro de eventos como su posterior análisis.

## **5.3 APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CATÁLOGO**

### ***5.3.1 Levantamiento de información para el análisis técnico-operacional***

El primer paso en el levantamiento de información para el análisis consistió en realizar una llamada telefónica al operador del equipo de ósmosis inversa. Durante esta llamada se completó una encuesta elaborada en Excel que contenía la totalidad de los equipos involucrados en el sistema de purificación de agua. Al iniciar la entrevista, la primera pregunta para cada componente del sistema fue si la falla más crítica de dicho componente detenía la producción del equipo. Esta pregunta tuvo como objetivo centrar el análisis únicamente en los componentes más críticos del sistema. Asimismo, durante la encuesta se descartaron aquellos componentes que, según indicó el operador, presentan fallas muy poco probables de ocurrir.

Una vez identificados los activos de mayor impacto que efectivamente pueden presentar fallas, se formularon preguntas orientadas a estimar el rango de tiempo asociado al diagnóstico de la falla y al proceso de reparación. Además, se incorporó una pregunta adicional relacionada con la disponibilidad de repuestos para cada componente y el tiempo estimado de llegada en caso de requerir su reposición.

A partir de esta información se completó la totalidad de la encuesta, lo que permitió obtener estimaciones de tiempos optimistas y pesimistas para las distintas variables evaluadas. Posteriormente, se abordó la forma de cuantificar el impacto asociado a las fallas del sistema. Debido a que el sistema de purificación de agua participa en la totalidad de los procesos productivos de la empresa y que la información económica relacionada con ventas posee carácter reservado por tratarse de una empresa privada, se optó por estimar el impacto a partir de la cantidad de productos que dejan de producirse durante una detención del sistema. Para ello se utilizaron las metas de producción establecidas por la empresa, información que fue proporcionada mediante comunicación directa con la jefa de sostenibilidad y eficiencia de la organización.

### ***5.3.2 Análisis técnico-operacional de la implementación del catálogo de fallas***

En el análisis técnico-operacional se utilizaron todos los datos obtenidos durante la etapa de levantamiento de información. En primer lugar, se elaboró una tabla ordenada con los resultados de la encuesta, la cual reunió los tiempos asociados a todas las variables consideradas.

Una vez completada esta etapa, se procedió a convertir las metas de producción mensuales a producción por hora. Este valor de producción horaria fue posteriormente utilizado para calcular la cantidad de productos que se dejan de producir en un escenario pesimista y en un escenario optimista. Este procedimiento se realizó en dos ocasiones con el fin de comparar dos situaciones distintas. La primera correspondió a la condición actual del sistema, mientras que la segunda representó la situación propuesta con el catálogo de fallas integrado. La diferencia entre ambos escenarios radicó en que la situación que incorporó el catálogo de fallas presentó una reducción del 20 % en el tiempo de diagnóstico, lo que permitió estimar la cantidad de productos que se dejan de producir en cada caso.

### ***5.3.3 Evaluación de resultados y formulación de conclusiones***

El método de evaluación de los resultados se basó en el cálculo de un diferencial entre ambos escenarios, considerando las cantidades de productos no producidos en el caso actual y en la situación propuesta, lo que permitió estimar la cantidad de unidades cuya producción no se vería afectada al reducir el tiempo de diagnóstico. Además, dentro de los resultados evaluados se identificó un factor de alto impacto en el tiempo de reparación cuando ocurre una falla. Este factor corresponde al tiempo de espera asociado a la disponibilidad de repuestos y a la ausencia de una gestión de repuestos críticos. Con el fin de analizar este efecto, se elaboró una tabla que refleja el impacto que tiene la disponibilidad de repuestos en el tiempo total asociado a una falla.

Una vez finalizado lo anterior, para verificar que el modelo presentado mantuviera un comportamiento lógico, se realizó un análisis de sensibilidad. Este análisis permitió representar el comportamiento del sistema al modificar el factor de reducción aplicado al tiempo de diagnóstico, evidenciando una tendencia creciente o decreciente según la variación de dicho parámetro.

Con base en los cálculos realizados, se obtuvieron conclusiones alineadas con el objetivo principal del trabajo, así como otras que surgieron durante el desarrollo del análisis. Estas conclusiones evidenciaron un impacto mayor al previsto en la problemática de indisponibilidad del sistema. Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con un caso de estudio relacionado con un equipo de ósmosis inversa, correspondiente a un trabajo de maestría en mantenimiento industrial. Esta comparación permitió identificar conclusiones similares respecto a la forma en que se gestiona el mantenimiento de estos equipos en la industria.

## 6 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo a desarrollar tiene como propósito mejorar la comprensión del estudio mediante la entrega de un contexto más detallado del trabajo. Para ello, se definirán los conceptos clave que serán utilizados en la investigación, junto con la explicación de la normativa aplicada y los fundamentos teóricos relacionados con el mantenimiento y la confiabilidad.

### 6.1 MANTENIMIENTO

Según la *British Standards Institution* (2016), el mantenimiento se define como “la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un equipo, destinadas a mantenerlo o restablecerlo a un estado en el que pueda realizar la función requerida” (p. 18).

En base a la definición anterior, el objetivo principal del mantenimiento es alcanzar los niveles de disponibilidad requeridos según el rubro y las condiciones operacionales de cada sistema. Es común que se establezcan planes de mantenimiento o indicadores de mantenibilidad considerando únicamente la similitud entre equipos, sin tener en cuenta que un contexto operacional distinto puede modificar completamente las necesidades de intervención. Factores como la carga de trabajo, el entorno operacional, la variabilidad humana y las condiciones ambientales influyen directamente en la estrategia de mantenimiento más adecuada.

Para cumplir con los niveles de disponibilidad exigidos, existen dos enfoques de acción: el mantenimiento reactivo y el mantenimiento proactivo. A continuación, se profundizará en los tipos de mantenimiento más relevantes y utilizados dentro de cada grupo.

### **6.1.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO (ACCIÓN REACTIVA)**

Comenzamos por definir qué es una acción reactiva dentro del mantenimiento. Como menciona Pistarelli (2010), este tipo de acción consiste en recuperar la función perdida a causa de un evento inesperado.

En la mayoría de los enfoques que se puede tener respecto el mantenimiento, las acciones correctivas son desfavorables para la organización. Si bien es inevitable contar con cierta cantidad de mantenimientos correctivos, el objetivo es reducir al máximo posible su ocurrencia.

Pistarelli (2010) menciona que las organizaciones que cuenten con demasiados mantenimientos no planificados, primero, necesitan una cantidad de personal mayor para estos eventos; segundo, dificulta la creación de presupuestos por lo impredecible que son los eventos; y tercero, habitualmente los fallos se vuelven crónicos, ya que se prioriza la rápida restauración por sobre la calidad, además de aumentar el riesgo para los trabajadores al realizar trabajos de emergencia.

### **6.1.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO (ACCIÓN PROACTIVA)**

Una acción proactiva puede definirse como toda decisión implementada con el objetivo de anticiparse a la ocurrencia de una falla. Implementar un plan de mantenimiento es considerado una acción proactiva.

Uno de los métodos más utilizados dentro de este enfoque es el mantenimiento preventivo, el cual consiste en realizar el reemplazo o intervención de componentes en función del tiempo, número de ciclos, kilómetros u otras variables de uso, sin considerar necesariamente el estado real del componente.

Entre los aspectos positivos de esta metodología se encuentra la reducción significativa de mantenimientos correctivos. Sin embargo, su principal desventaja es el

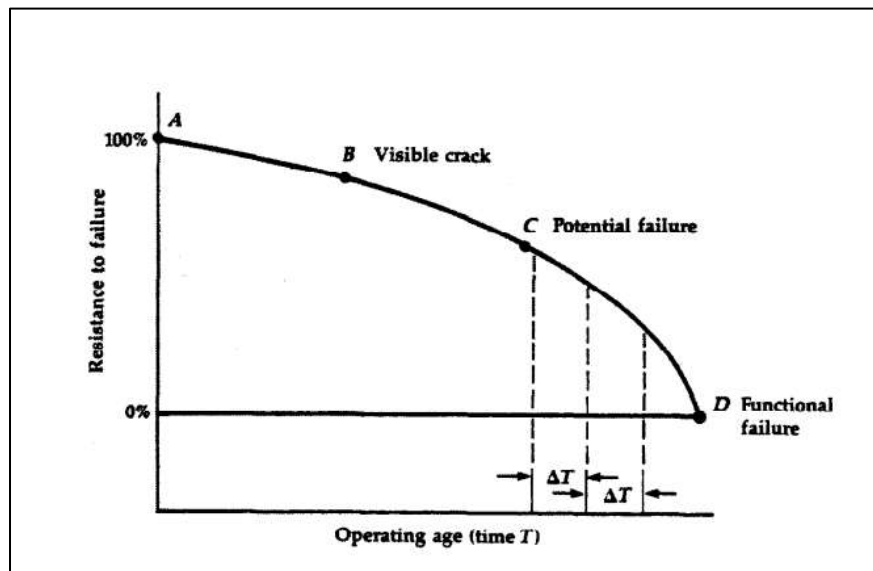
reemplazo prematuro de componentes que aún podrían mantenerse en servicio, lo que genera costos adicionales en materiales y repuestos.

### 6.1.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO (ACCIÓN PROACTIVA)

Como la premisa de trabajo en el mantenimiento preventivo es actuar en relación con el tiempo de funcionamiento y no se realiza un análisis del componente, aquí se corrige esa falencia mediante el monitoreo constante o periódico, con el objetivo de obtener la máxima vida útil del y planificar las intervenciones antes de que ocurra la falla.

Como se representa en el gráfico a continuación, este tipo de acciones permite detectar fallos potenciales dando tiempo a la acción.

*Figura 1: Curva P-F. Intervalo de inspección ( $\Delta T$ ) establecido para detectar una falla potencial antes de que ocurra la falla funcional.*



*Fuente. Tomado de Reliability-centered maintenance (p. 53), por F. S. Nowlan y H. F. Heap, 1978, National Technical Information Service*

En la Figura xx se representa el cómo la aplicación de medidas de monitoreo predictivo permite identificar el punto “C”, correspondiente a una falla potencial,

disponiendo de un intervalo de tiempo “ $\Delta T$ ” para actuar. Es ideal ejecutar el plan de mantenimiento dentro del intervalo, antes de llegar al punto “D”, que es el evento de falla esperado.

Entre las técnicas utilizadas en el monitoreo de condición se encuentran habitualmente:

- Análisis de Vibraciones.
- Análisis de aceite.
- Termografía.
- Ultrasonido.
- Análisis de partículas magnéticas.

#### **6.1.4 INDICADORES DE MANTENIMIENTO**

Los indicadores clave de rendimiento (KPI's, por sus siglas en inglés) son fundamentales en la medición objetiva de avance y cumplimiento de procesos claves. Existen una cuantiosa cantidad de indicadores y constantemente se desarrollan nuevos, dependiendo del contexto requerido. A continuación, se abordarán los indicadores que son impactados por la aplicación del catálogo de fallas:

##### ***6.1.4.1 Disponibilidad***

En el ámbito del mantenimiento, de los más relevantes es la disponibilidad, ya que se asocia directamente con el objetivo principal del mantenimiento: Garantizar o restaurar la función de un equipo, de este modo maximizando la disponibilidad operativa.

Se representa mediante la siguiente formula:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \times 100$$

Con:  $MDT = MTTR + MWT$

$D$  = Disponibilidad

$MTBF$  = Tiempo medio entre fallas (indicador de confiabilidad).

$MDT$  = Tiempo medio de inactividad (indicador de mantenibilidad).

$MWT$  = Tiempo medio de espera (Espera de repuestos o logística).

$MTTR$  = Tiempo medio de reparación (Diagnóstico y reparación)

El indicador de disponibilidad se compone principalmente de dos factores. El primero corresponde a la confiabilidad del equipo, la cual se refleja a través del indicador MTBF. El segundo factor es la mantenibilidad, representada mediante los indicadores MWT y MTTR. La mantenibilidad se descompone en estos dos indicadores debido a que resulta clave distinguir si las variaciones en su desempeño se deben a problemas de ejecución o aspectos logísticos.

El objetivo del catálogo de fallas y de la hoja de registro es impactar directamente en los indicadores de mantenibilidad, reduciendo los tiempos de ejecución ante la ocurrencia de una avería. Esto se logra mediante la disminución del tiempo de diagnóstico y la identificación de repuestos críticos en componentes de alto impacto.

### 6.1.5 PERDIDAS DE PRODUCTIVIDAD

Las pérdidas de productividad por indisponibilidad será el indicador clave que validará los beneficios de la implementación en la metodología de registro de fallas:

$$PP_{ind} = NP_h * T_{tot}$$

Con:  $T_{tot} = T_{diag} + T_{rep} + T_{esp,r} + T_{san}$

$T_{diag}$  = Tiempo de diagnóstico.

$T_{rep}$  = Tiempo de reparación.

$T_{esp,r}$  = Tiempo de espera por repuestos.

$T_{san}$  = Tiempo de sanitizado correspondiente a intervenciones mayores.

Donde:

$T_{tot}$  = Tiempo total de las reparaciones.

$NP_h$  = No producción por hora

El valor del indicador corresponde a un dato de productos no fabricados, es decir, un valor elevado del indicador representar altos costos de no producción asociados a los tiempos de detención.

### 6.1.6 IMPACTO DE REPUESTOS

Representa una proporción en porcentaje del tiempo que representa la espera de repuestos en la detención total del equipo:

$$\text{Donde: } I_r = \frac{T_{esp}}{T_{tot}}$$

$T_{tot}$  = Corresponde al tiempo total de reparación

$T_{esp}$  = Es el tiempo esperado netamente en la llegada del repuesto

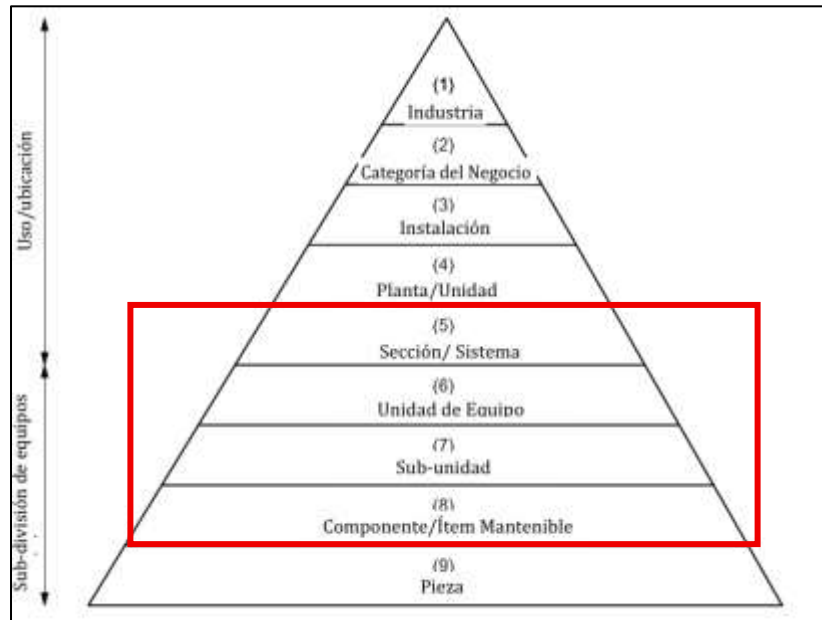
Con este indicador se hará evidente que la mayor parte de indisponibilidad en fallas que comprometen la función del sistema, son asociadas a problemas de logista y la necesidad de solicitar repuestos al extranjero.

## 6.2 NORMA ISO 14224

La norma ISO 14224 está dirigida principalmente a las industrias del petróleo, petroquímica y gas natural, centrandó su enfoque en la recolección de datos, la calidad de la información y una estructura recomendada para estandarizar el registro de fallas en los sistemas industriales (British Standards Institution, 2016).

El presente trabajo de título se enfoca en la industria farmacéutica, dónde se utilizó la pirámide taxonómica proporcionada por la norma para definir el sistema objetivo.

**Figura 2: Pirámide taxonómica de jerarquía de los equipos**



**Fuente. Tomado de ISO 14224:2016, Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.**

En dicha pirámide se representan los niveles jerárquicos definidos por la norma, que van desde el ámbito más general como la industria, hasta el más específico, correspondiente a la parte o componente mantenible.

El catálogo de fallas desarrollado en este trabajo se situará entre los niveles 5 y 8, es decir:

- Nivel 5, identifica el sistema de purificación de agua.
- Nivel 6, define los procesos del sistema de purificación de agua.
- Nivel 7, detalla los equipos de cada proceso del sistema.
- Nivel 8 corresponde al ítem mantenible del nivel 7.

Además de la taxonomía, se utilizará como guía la metodología propuesta por la norma para desarrollar el catálogo de fallas.

## 6.2.1 CATÁLOGO DE FALLAS

Un catálogo de fallas cumple la función de vincular la información entre los operadores y mantenedores mediante un registro estandarizado. Precisamente, la norma entrega un conjunto de alternativas predefinidas que describen qué se dañó, como se manifestó la falla, su causa probable y una solución recomendada. Permitiendo al trabajador detallar con claridad el evento que origina la pérdida de las funciones.

El registro estructurado de la información le proporciona a la organización un histórico de fallas, con información específica al contexto operacional del equipo. En el caso de un posterior análisis de tendencias o estudio de confiabilidad en el equipo, la calidad de la información es fundamental para reducir la incertidumbre en las proyecciones.

### *6.2.1.1 Estructura del catálogo de fallas*

El catálogo de fallas propuesto en este trabajo, guiado por las directrices de la normativa correspondiente se compone de cinco columnas principales, que corresponden a:

- **Elemento mantenible:** Representa los componentes del equipo sobre los que se realizarán las acciones propuestas. En términos de la pirámide taxonómica, corresponde al nivel 8 “ítem mantenible”.

Definir de manera simple y precisa es fundamental, porque es el apartado que guiará al operador donde se encuentra el problema. Es por esto por lo que se evita indicar un componente demasiado específico y se enfatiza en ítems más identificables para el operador. En este proyecto, los elementos mantenibles se definirán combinando las subdivisiones propuestas por la ISO 14224 con la realidad del sistema de ósmosis inversa instalado.

**Tabla 1. Subdivisión de ítems mantenibles para bombas**

Equipo		Bomba			
Sub-unidad	Transmisión de potencia	Bomba	Control y monitoreo	Sistema de lubricación	Varios
Ítems mantenibles	Caja de engranaje/transmisión de velocidad variable Rodamiento Sellos Acoplamiento al accionador Acoplamiento a la unidad impulsada Cinta/polea	Soporte Carcasa Accionador Eje Rodamiento radial Rodamiento de empuje Sellos Válvulas Tuberías Recubrimiento interior de cilindro Pistón Diafragma	Dispositivo de accionamiento Unidad de control Suministro de energía interna Sensores de monitoreo <sup>a</sup> Válvulas Cableado Tuberías Sellos	Tanque Bomba Motor Filtro Refrigerador Válvulas Tuberías Aceite Sellos	Aire de limpieza Sistema de calefacción/enfriamiento Separador de ciclones Amortiguación de pulsaciones Uniones embridadas
<sup>a</sup> Especificar tipo de sensor, p.ej. presión, temperatura, nivel, etc.					

**Fuente.** Tomado de ISO 14224:2016, *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.*

- **Modo de falla:** La norma lo define como “el efecto por el cual una falla es observada” (British Standards Institution, 2016), es decir, lo que el trabajador ve, escucha o percibe en el equipo al presentarse una falla.

Los modos de falla propuesto se encuentran divididos en 9 familia de equipos, tales como rotatorios, mecánicos, eléctricos, seguridad y control, entre otros. En las familias de equipos se especifican modos de falla probables que se acompañan con una “x” en caso de que el equipo pueda presentar dicho modo de falla.

Es de gran relevancia mantener un lenguaje simple, concreto y no ambiguo, ya que cualquier persona dentro de la organización debe ser capaz de identificar el modo de falla a partir de lo que observa y seleccionarlo en el sistema al generar un aviso. Siempre apoyado en los modos de falla propuestos por la norma y adaptados según el contexto propio del equipo.

**Tabla 2. Familia de equipos rotativos y sus modos de falla**

Código de modo de falla	Descripción	Ejemplos	Código de clase de equipo							
			CE	CO	EG	EM	GT	PU	ST	TE
			Motores de combustión	Compresores	Generadores eléctricos	Motores eléctricos	Turbinas de gas	Bombas	Turbinas de vapor	Turboexpansores
AIR	Lectura anormal en instrumento	Falsa alarma, indicación errónea en instrumento	X	X	X	X	X	X	X	X
BRD	Parada	Daños graves (agarrotamiento, rotura)	X	X	X	X	X	X	X	X
ERO	Producción errática	Oscilación, variación, inestabilidad	X	X		X	X	X	X	X
ELF	Fuga externa - combustible	Fuga externa de suministro de combustible/gas	X				X		X	
ELP	Fuga externa - medio del proceso	Aceite, gas, condensado, agua		X			X	X	X	X
ELU	Fuga externa - medio de suministro	Lubricante, aceite de enfriamiento	X	X	X	X	X	X	X	X
FTS	Falla en el arranque bajo	No arranca bajo demanda	X	X	X	X	X	X	X	X
HIO	Alta producción	Exceso de velocidad/ producción sobre nivel aceptado	X	X		X	X	X	X	X
INL	Fuga interna	Fuga interna de fluidos de proceso o suministro	X	X			X	X	X	X
LOO	Baja producción	Rendimiento/producción por debajo de nivel aceptado	X	X	X	X	X	X	X	X
NOI	Ruido	Ruido anormal	X	X	X	X	X	X	X	X
OHE	Sobrecalentamiento	Piezas del equipo, escape, agua de enfriamiento	X	X	X	X	X	X	X	X
PDE	Desviación de parámetros	Parámetro monitoreado excede los límites, p.ej. alarma alto/bajo	X	X	X	X	X	X	X	X
PLU	Taponamiento/ atascamiento	Restricción de flujo	X	X			X	X	X	X
SER	Problemas menores en servicio	Ítems sueltos, decoloración, suciedad	X	X	X	X	X	X	X	X
STD	Deficiencia estructural	Daños materiales (grietas, desgaste, fracturas, corrosión)	X	X	X	X	X	X	X	X
STP	Falla en detención bajo demanda	No se detiene bajo demanda	X	X	X	X				
OTH	Otro	Modos de falla no cubiertos anteriormente	X	X	X	X	X	X	X	X
UNK	Desconocido	Información insuficiente para definir modo de falla	X	X	X	X	X	X	X	X
UST	Parada espuria	Parada inesperada	X	X	X	X	X	X	X	X
VIB	Vibración	Vibración anormal	X	X	X	X	X	X	X	X

**Fuente. Tomado de ISO 14224:2016, Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.**

- Causa de falla:** Esta columna representa el mecanismo físico que origino la falla, también llamada causa raíz del problema. La norma agrupa las causas de falla en amplias categorías relacionadas con el diseño, fabricación, instalación, mantenimiento, gestión y otros.

La columna de causa de falla no entra en función al momento de generar el aviso, sino que en la etapa de cierre cuando el personal técnico realiza el diagnóstico y se puede determinar con precisión la causa de falla.

**Tabla 3. Grupos asociados a causas de falla**

Número de código	Notación	No. Código de subdivisión	Subdivisión de la causa de falla	Descripción de la causa de falla
1	Causas relacionadas al diseño	1.0	General	Diseño o configuración inapropiada del equipo (forma, tamaño, tecnología, configuración, operabilidad, mantenibilidad, etc.), pero no se conocen mayores detalles.
		1.1	Capacidad inapropiada	Dimensiones/capacidad inadecuada.
		1.2	Material inapropiado	Selección de materiales inapropiados.
2	Causas relacionadas a la fabricación/ instalación	2.0	General	Falla relacionada a la fabricación o instalación, pero no se conocen mayores detalles.
		2.1	Falla de fabricación	Falla de fabricación o procesamiento.
		2.2	Falla de instalación	Falla de instalación o montaje (no incluye montaje después de mantenimiento)
3	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento	3.0	General	Falla relacionada a la operación/uso o mantenimiento del equipo, pero no se conocen mayores detalles.
		3.1	Servicio no provisto/ no diseñado	Condiciones de servicio imprevistas o no diseñadas, p.ej. operación del compresor fuera del rango apropiado, presión mayor a las especificaciones, etc.
		3.2	Error de operación	Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante la operación (ej. debido a fatiga humana)
		3.3	Error de mantenimiento	Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante el mantenimiento (ej. debido a fatiga humana)
		3.4	Desgaste esperado	Falla causada por el desgaste resultante de la operación normal del equipo
4	Falla relacionada a la gestión	4.0	General	Falla relacionada a problemas de gestión, pero no se conocen mayores detalles.
		4.1	Error de documentación	Error humano: Falla relacionada a procedimientos, especificaciones, planos, reportes, etc. (ej. debido a fatiga humana)
		4.2	Error de gestión	Falla relacionada a la planificación, organización, aseguramiento de calidad, etc.

Número de código	Notación	No. Código de subdivisión	Subdivisión de la causa de falla	Descripción de la causa de falla
5	Varios <sup>a</sup>	5.0	Varios - general	Causas que no entran en una de las categorías anteriores
		5.1	Ninguna causa encontrada	Falla investigada, pero no encontró una causa específica
		5.2	Causa común	Causa/modo común <sup>b</sup>
		5.3	Causas combinadas	Varias causas actúan simultáneamente. Si existe una causa predominante, esta debe ser codificada.
		5.4	Falla de otra unidad/ en cascada	Falla debido a la falla de otro equipo, sub-unidad o ítem mantenible (falla en cascada)
		5.5	Otros	Sin código aplicable: Utilizar texto libre para registrar causa.
		5.6	Desconocido	No existe información disponible acerca de la causa de falla

*Fuente. Tomado de ISO 14224:2016, Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.*

- **Actividad recomendada:** Corresponde a la actividad sugeridas por la norma para recuperar la función perdida del equipo. Entrega propuestas como, ajustar, reparar, inspeccionar, reparar, entre otras. Siguiendo la estructura de información concreta y simple.

Esta columna de información será retroalimentada más adelante, con el objetivo de que las acciones recomendadas sean cada vez más asertivas. De esta manera, consiguiendo agilizar los tiempos de acción desde el momento que se emite el aviso de falla hasta su corrección.

**Tabla 4. Actividades recomendadas de mantenimiento**

Código Numérico	Actividad	Descripción	Ejemplos	Uso <sup>a</sup>
1	Reemplazar	Reemplazo del ítem por un ejemplar nuevo o rehabilitado del mismo tipo y marca	Reemplazo de un rodamiento desgastado	C, P
2	Reparar	Acción de mantenimiento manual realizada para restaurar un ítem a su apariencia o estado original	Reempaquetamiento, soldadura, llenado, reconexión, refabricación, etc.	C
3	Modificar <sup>b</sup>	Reemplazar, renovar o cambiar el ítem, o una parte de ello, con una pieza de otro tipo, marca, material o diseño	Instalar un filtro con una malla de menor diámetro, reemplazar una bomba de aceite de lubricación con una bomba de otro tipo, reconfiguración, etc.	C, P
4	Ajustar	Restaurar cualquier condición fuera de tolerancia al rango de tolerancia	Alinear, configurar y reconfigurar, calibrar, equilibrar	C, P
5	Reequipamiento	Actividad de reparación/servicio menor para restaurar un ítem a una apariencia aceptable, tanto interna como externa.	Pulido, limpieza, fresado, pintura, recubrimiento, lubricación, cambio de aceite, etc.	C, P
6	Revisión <sup>c</sup>	Se investiga la causa de la falla, pero no se realiza ninguna actividad de mantenimiento, o la acción se posterga. Función recuperada a través de acciones simples, p.ej. reiniciar o reconfigurar	Reinicio, reconfiguración, ninguna acción de mantenimiento, etc. Especialmente relevante para fallas funcionales, p.ej. detectores de incendio y gas, equipos submarinos	C
7	Servicio	Tareas de servicio periódico: normalmente el ítem no se desarma	ej. limpieza, reposición de suministros consumibles, ajustes y calibraciones	P
8	Prueba	Prueba periódica de funcionamiento o rendimiento	Prueba de función de un detector de gas, prueba de exactitud de un flujómetro	P
9	Inspección	Inspección/verificación periódica: escrutinio cuidadoso de un ítem con o sin desarmado, normalmente a través de los sentidos	Todo tipo de verificación general. Incluye mantenimiento menor como parte de la tarea de inspección.	P
10	Reacondicionamiento	Reacondicionamiento mayor	Inspección/acondicionamiento general con desarmado y reemplazo de ítems según se especifique o se requiera	C, P
11	Combinación	Incluye varias de las actividades anteriores	Si una actividad predomina, ésta puede registrarse	C, P
12	Otros	Actividad de mantenimiento diferente a las anteriores	ej. actividades de protección	C, P

**Fuente.** Tomado de ISO 14224:2016, *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.*

- **Actividad ejecutada:** Finalmente se registra lo que realmente se hizo sobre el equipo para recuperar su función. Realizar esta distinción entre lo planeado y ejecutado es crucial para evaluar las acciones tomadas. Alimentando la base de datos y realizando ajustes para futuros acontecimientos similares agilizando las acciones.

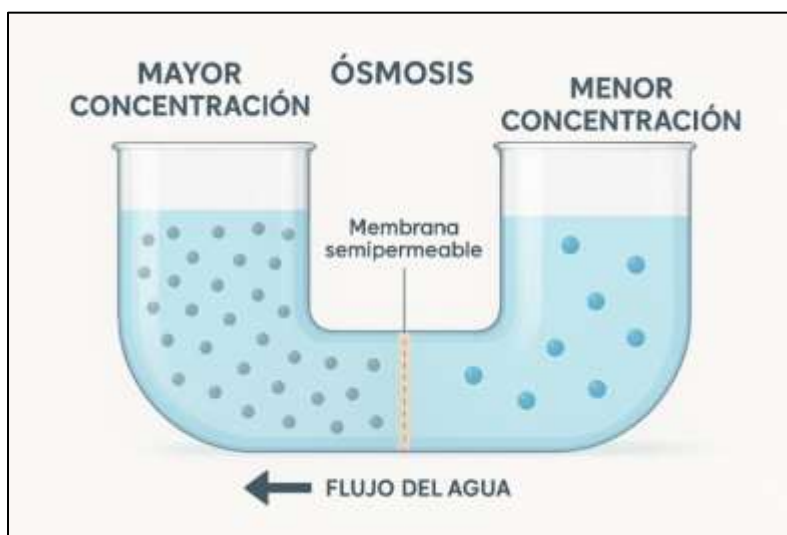
### 6.3 ÓSMOSIS INVERSA

Para explicar el proceso de ósmosis inversa, primero es necesario definir el fenómeno de la ósmosis. En términos simples, la ósmosis es un proceso natural en el cual existen dos disoluciones con diferentes concentraciones de solutos, separadas por una membrana semipermeable.

Este fenómeno busca equilibrar las concentraciones, permitiendo que la disolución con menor concentración atraviese la membrana hacia la que posee mayor concentración, hasta alcanzar un punto de equilibrio entre ambas.

Como se representa en la siguiente imagen:

*Figura 3: Explicación del principio de ósmosis.*



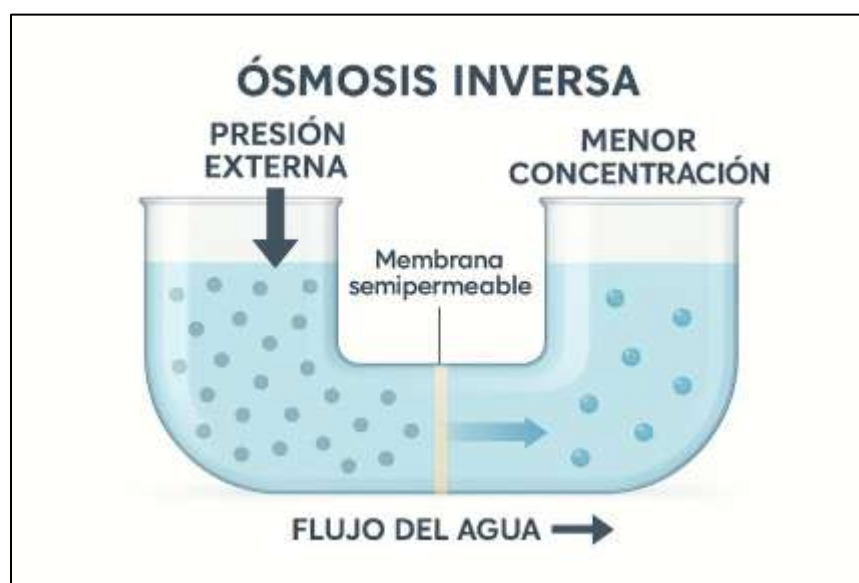
*Fuente. Elaboración propia.*

Ahora que se definió el principio de ósmosis, es posible explicar su proceso inverso. Tal como indica su nombre, la ósmosis inversa consiste en revertir el flujo natural del fenómeno osmótico, haciendo que el fluido se desplace desde el lado de mayor concentración hacia el de menor concentración.

Esto se logra aplicando una presión externa superior a la presión osmótica, forzando el paso del agua a través de la membrana semipermeable y separando eficientemente los solutos disueltos. Siendo los productos de este proceso un agua de alta pureza llamado permeado y un agua con mayor carga llamado concentrado o agua de rechazo.

A continuación, una representación de este proceso:

*Figura 4: Explicación del principio de ósmosis inversa.*



*Fuente. Elaboración propia.*

La etapa de la ósmosis inversa es un proceso vital dentro del sistema de purificación, pero hay dos etapas igualmente relevantes para lograr la función del equipo, la primera etapa que consiste en el pretratamiento se encarga de preparar el agua para entrar en el sistema OI, esto lo realiza primero atravesando un sistema de filtrados a distintas escalas y ablandamientos mediante resinas ajustando el pH y ORP adecuado. Luego esa agua es tratada y purificada, para entrar a la última etapa que corresponde su almacenamiento y distribución,

ya que el agua purificada debe mantenerse en constante circulación para evitar la proliferación de microorganismos, además de ser un medio para bajar la temperatura del fluido posterior a la purificación.

## **7 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE AGUA**

El presente capítulo responde al objetivo específico N°1, el cual consiste en identificar los equipos del sistema de purificación de agua mediante un levantamiento técnico-operativo. En este apartado se describe el funcionamiento general del sistema y los componentes que lo integran, con el fin de establecer la base estructural necesaria para el desarrollo del catálogo de fallas.

### **7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA**

El sistema de producción de agua purificada IPA-2 corresponde al modelo SP-EDI-050-HWSV, de procedencia argentina y fabricado en el año 2023. Cuenta con una capacidad nominal de producción de 500 L/h, característica que permite situar el equipo dentro de sistemas de purificación de agua de mediana capacidad, diseñados para aplicaciones industriales que requieren un suministro continuo y controlado de agua de calidad farmacéutica (Manual básico de operaciones IPA-2, 2023).

Para comprender el funcionamiento del sistema, lo primero que se debe considerar es el origen de la materia prima, es decir, el agua. Esta proviene del sistema de agua potable, ingresando al sistema con un nivel de pureza considerable, a diferencia de otros sistemas que requieren desalar agua de mar y, por lo tanto, deben incorporar etapas adicionales de tratamiento debido a su origen.

Una vez establecido lo anterior, es necesario responder a la siguiente pregunta: ¿cuál es la función del sistema dentro de la planta? Su función principal es proporcionar agua de calidad farmacéutica a todos los puntos donde esta es requerida, constituyendo una materia

prima esencial en la totalidad de los productos comercializados por la empresa. Además, se utiliza en procesos de limpieza de equipos donde se realizan maceraciones, lo que lo convierte en un activo indispensable para el funcionamiento integral de la planta.

El sistema de purificación de agua se estructura en distintas etapas principales que permiten alcanzar la calidad requerida. El pretratamiento maneja el agua de entrada mediante procesos de filtración, ablandamiento y dosificación química. Luego, la etapa de generación, basada en ósmosis inversa y electrodesionización, realiza la purificación del agua eliminando sales y contaminantes disueltos. Posteriormente, el agua purificada es conducida hacia el sistema de almacenamiento, donde se conserva en condiciones controladas, para finalmente ser distribuida a través de un sistema de recirculación hacia los distintos puntos de uso dentro de la planta. Estas etapas serán desarrolladas en detalle en los apartados siguientes.

Abordando la operación del sistema de purificación, este requiere de la intervención de un operador, quien cumple un rol fundamental en su puesta en marcha, supervisión y ajuste de los parámetros operacionales. El sistema es capaz de gestionar de forma automática ciertas condiciones de operación, como la producción de agua en función del nivel del estanque de almacenamiento y la activación de la recirculación en el sistema de distribución. Sin embargo, la selección de los modos de operación, el ajuste de variables críticas como el caudal y la presión, así como la ejecución de procedimientos de limpieza, sanitización y mantenimiento, dependen directamente de la intervención del operador. De esta forma, la operación del sistema se basa en una interacción entre automatización y control humano, donde el operador asegura que las condiciones de operación se mantengan dentro de los parámetros establecidos y responde ante posibles desviaciones del proceso.

*Figura 5: Sistema de purificación de agua.*



*Fuente. Elaboración propia.*

## **7.2 FLUJO DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN**

El proceso se inicia con el ingreso de agua de alimentación, la cual es impulsada hacia la etapa de pretratamiento. En esta fase, el sistema acondiciona el agua mediante filtración, ablandamiento y dosificación química, con el objetivo de eliminar sólidos suspendidos, reducir la dureza y controlar parámetros como el potencial de oxidación-reducción. Este factor resulta fundamental para evitar incrustaciones, ensuciamiento y degradación prematura de las membranas del sistema de ósmosis inversa.

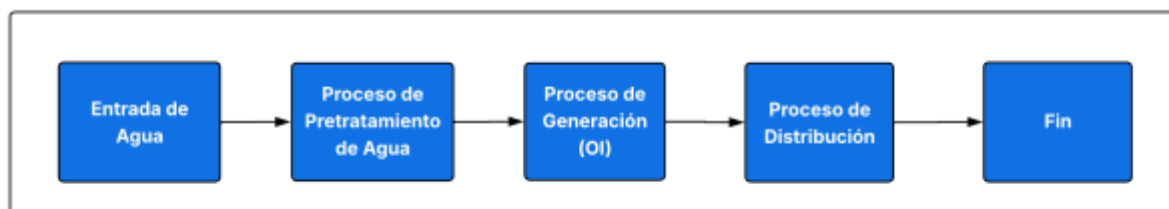
Posteriormente, el agua pretratada es conducida hacia la etapa de generación, donde se realiza el proceso principal de purificación mediante ósmosis inversa. Para ello, el sistema incrementa la presión del fluido hasta valores operacionales adecuados, permitiendo forzar el paso del agua a través de membranas semipermeables que retienen sales, minerales y otros contaminantes. Como resultado de este proceso se obtienen dos corrientes: el permeado, correspondiente al agua purificada, y el concentrado, que contiene los contaminantes rechazados.

El permeado generado en la ósmosis inversa es posteriormente tratado en un módulo de electrodesionización (EDI), el cual permite reducir aún más la conductividad del agua mediante un proceso continuo de intercambio iónico, sin necesidad de regeneración química. Este proceso asegura que el agua cumpla con los estándares requeridos para su uso en la industria farmacéutica.

Una vez alcanzada la calidad requerida, el agua purificada es almacenada en un estanque de acumulación, desde donde es distribuida hacia los puntos de consumo a través de un sistema de recirculación. Este sistema de distribución mantiene el agua en movimiento permanente, evitando su estancamiento y reduciendo el riesgo de proliferación microbiológica. Adicionalmente, el sistema incorpora etapas de desinfección mediante radiación ultravioleta, reforzando el control sanitario del proceso.

El sistema cuenta con distintos modos de operación que permiten adaptar su funcionamiento a las condiciones del proceso. Entre estos se incluyen el modo de producción, en el cual se genera agua purificada, el modo de derivación, que permite recircular el flujo cuando no se requiere producción inmediata, el modo de limpieza automática (auto flush), utilizado para el mantenimiento de las membranas, y el modo de espera, que gestiona el funcionamiento del sistema en función del nivel del estanque de almacenamiento. Estas configuraciones permiten optimizar la operación, prolongar la vida útil de los componentes y asegurar la continuidad del suministro de agua purificada.

**Figura 6: Diagrama del sistema de purificación de agua.**



**Fuente. Elaboración propia.**

### 7.3 ETAPA DE PRETRATAMIENTO

La etapa de pretratamiento es fundamental en cualquier sistema de ósmosis inversa, ya que su principal función es proteger y prolongar la vida útil de los equipos presentes en la etapa de generación. La ausencia de este sistema, podrían generarse problemas como la saturación prematura de los filtros, la corrosión en membranas de osmosis inversa debido a variaciones de pH o la contaminación del sistema, alejándolo de los parámetros de operación requeridos. En este sentido, el pretratamiento permite extender los tiempos operativos, evitando pérdidas por detenciones no programadas y la rotación acelerada de componentes.

Una vez que el agua es extraída desde la red, el proceso se inicia con la eliminación de sólidos suspendidos mediante un filtro multimedia. Según el catálogo del equipo, este sistema de filtración opera con cuatro tipos de lecho como material filtrante: antracita, arena, grava 2–4 y grava 6F (Knop S.A., 2024).

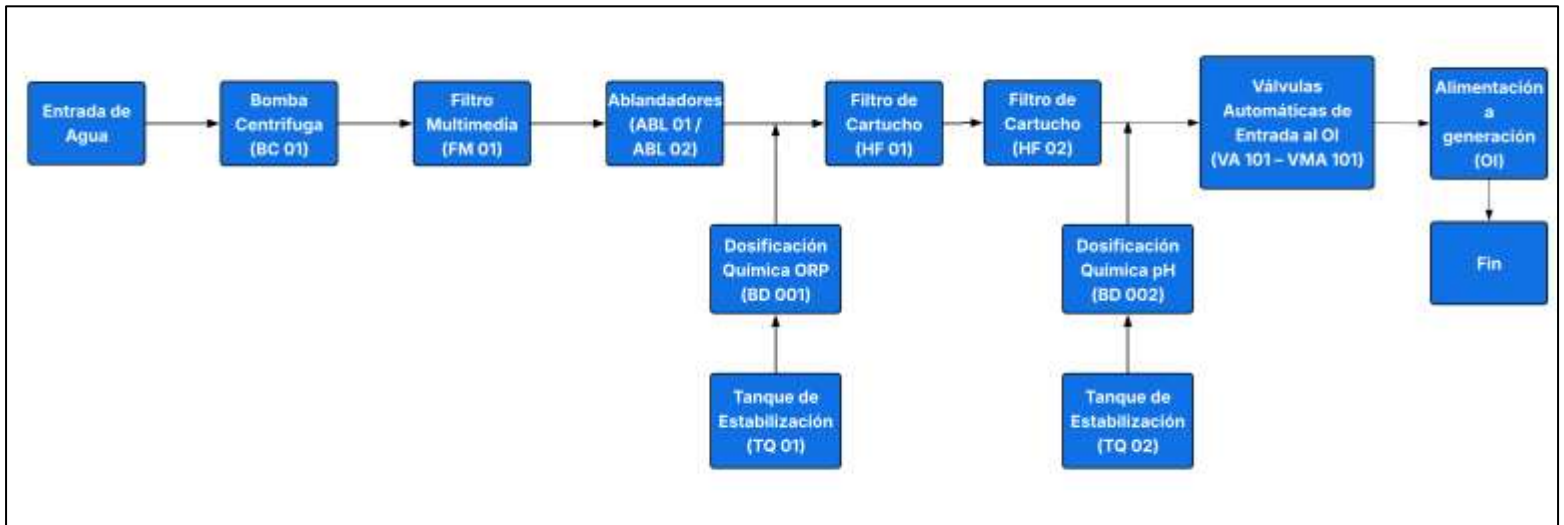
Posteriormente, el agua es sometida a un proceso de ablandamiento, cuyo objetivo es reducir la dureza mediante el uso de resinas catiónicas fuertes. Este proceso también incorpora un lecho compuesto por grava 2–4 y 6F, lo que contribuye adicionalmente a la filtración del fluido.

A continuación, el flujo es conducido a través de un sistema de dosificación química, donde bombas dosificadoras ajustan parámetros críticos del agua, como el pH, con el objetivo de prevenir daños especialmente aquellos asociados a procesos de oxidación por presencia de cloro.

Finalmente, como última etapa de protección antes del ingreso a la unidad de generación, el agua circula a través de filtros de cartucho, los cuales retienen las partículas en suspensión remanentes. De esta forma, el fluido alcanza condiciones adecuadas para su ingreso a la siguiente etapa del proceso

A continuación, se presenta el diagrama de bloques correspondiente a la etapa de pretratamiento del sistema de purificación de agua, el cual permite visualizar la secuencia operativa y la interacción entre los equipos involucrados.

Figura 7: Diagrama del sistema de pretratamiento.



Fuente. Elaboración propia.

### 7.3.1 Descripción de componentes del sistema de pretratamiento

- **Bomba Centrífuga (BC 01):** Se encarga de impulsar el agua a través de todo el pretratamiento, aportando el caudal y presión necesaria para atravesar los filtros y llegar al sistema de ósmosis inversa.
- **Filtro Multimedia (FM 01):** Realiza el primer filtrado del agua, removiendo sólidos en suspensión, turbidez y las partículas más grandes. Protegiendo los equipos posteriores.
- **Ablandadores (ABL 01 / ABL 02):** Se utilizan resinas de intercambio iónico para remover durezas como calcio y magnesio. Implementado para proteger principalmente las membranas de OI frente a las incrustaciones.
- **Filtros de Cartucho (HF 01 / HF 02):** Funciona como ultima barrera de sólidos, eliminando partículas finas antes de la OI.

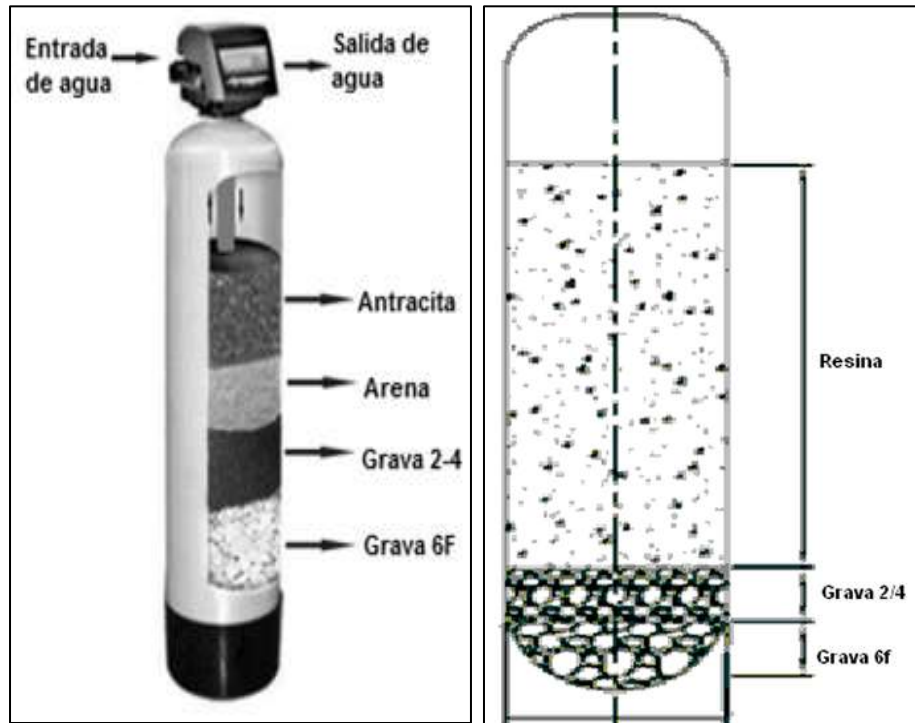
- **Bomba Dosificadora ORP (BD 001) y Tanque Estabilizador (TQ 001):** Sistema encargado de dosificar compuestos químicos oxidantes o reductores para ajustar el ORP del agua, controlando la actividad microbiológica. El tanque mantiene la mezcla en condiciones de utilización.
- **Bomba Dosificadora ORP (BD 002) y Tanque Estabilizador (TQ 002):** Sistema encargado de ajustar el pH del agua a niveles óptimos para proteger las membranas de OI.
- **Válvulas Automáticas de Entrada a la OI (VA 101 – VMA 101):** Regulan y habilitan el flujo hacia la etapa de OI. Actúan de forma automática mediante un sistema de control.

*Figura 8: Bomba Centrífuga pretratamiento.*



*Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 9: Filtro multimedia y ablandadores.**



*Fuente. Tomado de Catálogo IPA 2 (Knop S.A., 2024).*

**Figura 10: Bombas dosificadoras y filtro de cartucho.**



*Fuente. Elaboración propia.*

## 7.4 ETAPA DE GENERACIÓN OSMOSIS INVERSA

La etapa de generación corresponde al núcleo del sistema de purificación de agua, ya que en ella se lleva a cabo la retención de sales disueltas, compuestos orgánicos y otros contaminantes presentes en el fluido, permitiendo alcanzar los niveles de calidad requeridos para su uso en la industria farmacéutica. Un funcionamiento inadecuado en esta etapa puede provocar una disminución en la eficiencia del sistema, afectando directamente la calidad del agua producida y generando desviaciones respecto a los parámetros operacionales establecidos. En este contexto, la etapa de generación no solo cumple un rol en la purificación del agua, sino que también resulta fundamental para asegurar la continuidad operativa del sistema y la confiabilidad del proceso productivo.

Una vez que el agua ha sido acondicionada en la etapa de pretratamiento, el fluido es impulsado hacia el sistema de ósmosis inversa mediante una bomba de alta presión que, según lo indicado por Knop Laboratorios (s.f.) en su manual básico de operación, eleva la presión del agua a valores entre 9 y 15 bar, permitiendo superar la presión osmótica natural del sistema. Bajo estas condiciones, el agua es forzada a atravesar membranas semipermeables, reteniendo la mayor parte de las sales, microorganismos y contaminantes presentes en el flujo de alimentación.

Como resultado de este proceso se generan dos corrientes principales: el permeado, correspondiente al agua purificada, y el concentrado, que contiene los contaminantes rechazados. Este último es evacuado del sistema o, en determinadas condiciones operacionales, puede ser recirculado hacia las membranas de ósmosis inversa, aprovechando el acondicionamiento previo del fluido y contribuyendo a mejorar la recuperación global del sistema, la cual típicamente se encuentra en un rango entre 60% y 80%.

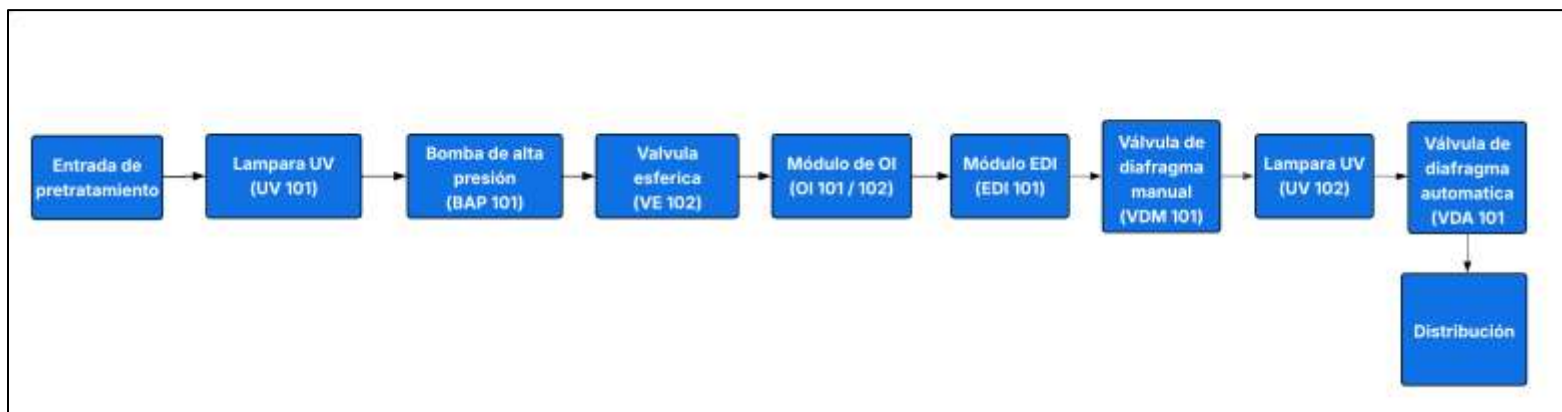
Posteriormente, el permeado obtenido es conducido hacia un módulo de electrodesionización (EDI), donde se realiza una etapa de pulido final del agua. Este proceso utiliza resinas de intercambio iónico y un campo eléctrico para remover los iones remanentes, permitiendo alcanzar niveles de conductividad acordes a los estándares requeridos, sin

necesidad de regeneración química. Obteniendo un agua de alta pureza apta para su uso en los procesos farmacéuticos.

Finalmente, como complemento al proceso de generación, el sistema puede incorporar etapas de desinfección mediante radiación ultravioleta, contribuyendo al control microbiológico del agua producida y asegurando la calidad sanitaria del sistema antes de su almacenamiento y distribución.

A continuación, se presenta el diagrama de bloques correspondiente a la etapa de generación del sistema de purificación de agua, el cual permite visualizar la secuencia operativa y la interacción entre los equipos involucrados.

*Figura 11: Diagrama del sistema de generación (OI).*

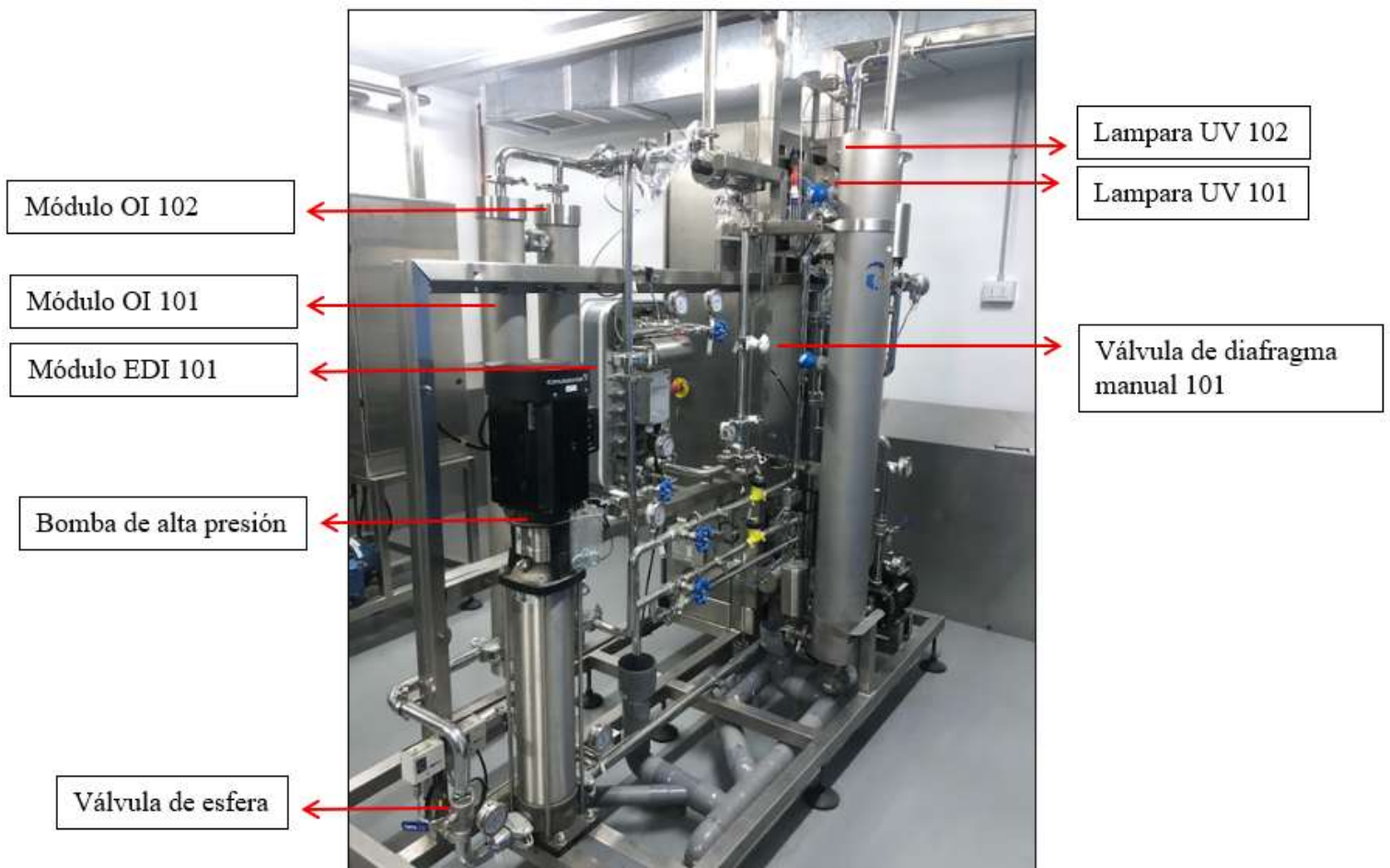


*Fuente. Elaboración propia.*

#### 7.4.1 Descripción de componentes del sistema de generación (OI)

- **Lámpara Ultravioleta (UV 101):** Realiza la desinfección inicial del agua antes de la ósmosis inversa, reduciendo carga bacteriana y protegiendo las membranas.
- **Bomba de alta presión (BAP 101):** Aumenta la presión del agua hasta niveles requeridos para el proceso de ósmosis inversa, haciendo posible la separación de sales y minerales.
- **Válvula de esfera (VE 102):** Permite aislar el sistema de osmosis inversa.
- **Módulo de Osmosis Inversa (OI 101/102):** Elemento principal encargado de la separación de sales y partículas mediante las membranas semipermeables. Produciendo el permeado y el concentrado.
- **Módulo de Electrodesionización (EDI 101):** Reduce la conductividad el agua de permeado mediante un intercambio iónico, permitiendo cumplir con los parámetros de conductividad deseados.
- **Válvula de Diafragma Manual (VDM 101):** Su función es regular el caudal de salida desde el EDI hacia la siguiente etapa.
- **Lámpara Ultravioleta (UV 102):** Segunda etapa de lampara ultravioleta para el control microbiológico del agua antes de pasar al tanque de distribución.
- **Válvula de Diafragma Automática (VDA 101):** Desviar el paso de agua fuera de parámetros hacia una recirculación de OI, aunque también otro porcentaje va a desagüe

*Figura 12: Sistema de generación (OI) vista (1).*



*Fuente. Elaboración propia.*

## 7.5 ETAPA DE ALMACENAMIENTO DISTRIBUCIÓN

Como se ha visto en las etapas anteriores, cada una cumple una función específica. En este contexto, el rol del sistema de almacenamiento y distribución es conservar la calidad del agua purificada una vez finalizado el proceso de generación, manteniendo sus propiedades químicas y microbiológicas dentro de los estándares requeridos hasta su uso.

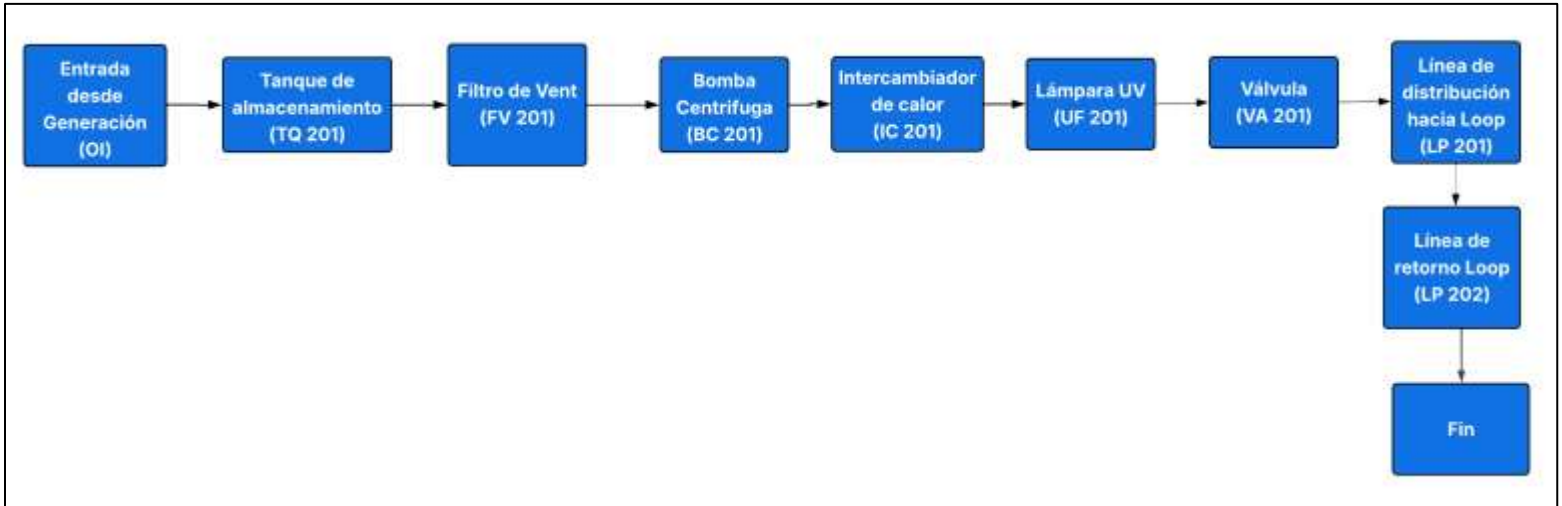
El sistema se compone principalmente de un tanque de almacenamiento con una capacidad de 3000L, el cual recibe el agua purificada proveniente de la etapa de generación, permitiendo disponer de un volumen suficiente para abastecer de manera continua a los distintos puntos de consumo dentro de la planta. Estos estanques están diseñados para minimizar la contaminación externa y cuentan con sistemas de ventilación controlada, correspondiente al FV201 del catálogo, el cual evita la entrada de partículas o microorganismos y permitiendo trabajar a presión atmosférica.

Desde el tanque de almacenamiento, el agua es impulsada mediante una bomba centrífuga de 5,5 HP hacia un intercambiador de calor y posteriormente a una lámpara UV. Ambos sistemas tienen como objetivo prevenir la contaminación del permeado, ya que la reducción de la temperatura del fluido y la aplicación de radiación UV generan condiciones poco favorables para la proliferación de microorganismos. Una vez realizado este tratamiento preventivo, el agua es enviada a través de un circuito cerrado denominado loop de distribución.

Este sistema está conformado por una red de tuberías que recorre los distintos puntos de uso y retorna nuevamente al estanque, formando un circuito de recirculación continua. La recirculación constituye un aspecto crítico en este tipo de sistemas, ya que permite mantener el agua en movimiento constante, evitando condiciones de estancamiento. Dichas condiciones representan un factor de riesgo relevante, debido a que favorecen el crecimiento microbiológico y pueden comprometer la calidad del fluido.

Finalmente, se presenta el diagrama de bloques correspondiente a la etapa de almacenamiento y distribución del sistema de purificación de agua, el cual permite visualizar la secuencia operativa y la interacción entre los equipos involucrados.

*Figura 13: Diagrama del sistema de distribución.*



*Fuente. Elaboración propia.*

### 7.5.1 Descripción de componentes del sistema de distribución

- **Tanque de almacenamiento (TQ 201):** Almacena el agua permeada y la mantiene en recirculación para evitar el estancamiento y cualquier tipo de contaminación.
- **Filtro de Vent (FV 201):** Permite la respiración del tanque sin riesgo de contaminación externa.
- **Bomba centrífuga (BC 201):** Genera el flujo dentro del sistema de distribución y recirculación. Fundamental para mantener el fluido en movimiento y renovación.
- **Intercambiador de calor (IC 201):** Se encarga de regular la temperatura del permeado, evitando condiciones favorables para la proliferación microbiológica.
- **Lámpara Ultravioleta (UV 201):** Purificación continua del permeado para limitar el crecimiento microbiológico.

- **Válvula (VA 201):** Permitir la distribución hacia el sistema o el retorno para recircular.
- **Línea de distribución Loop (LP 201):** Distribuye el agua permeada a los puntos donde será utilizada en la planta.
- **Línea de retorno Loop (LP 202):** Envía el agua desde el loop hacia el tanque asegurando la recirculación del permeado.

*Figura 14: Tanque de almacenamiento.*



*Fuente. Elaboración propia.*

*Figura 15: Intercambiador de calor y lampara UV.*



*Fuente. Elaboración propia.*

*Figura 16: Bomba centrífuga de distribución.*



*Fuente. Elaboración propia.*

## 8 CATÁLOGOS DE FALLAS

Una vez recopilada la información del sistema y comprendido su funcionamiento, el presente capítulo responde al objetivo específico N°2, enfocado en el desarrollo del catálogo de fallas y la hoja de registro basados en la norma ISO 14224. En esta sección se presenta la estructura definida para la clasificación de los ítems mantenibles, modos y causas de falla, con el propósito de estandarizar el registro de la información y facilitar su trazabilidad.

### 8.1 Introducción al catálogo de fallas

El catálogo fue desarrollado en un documento Excel, donde el sistema se subdividió en los tres niveles de proceso que se vio con anterioridad, y luego fue registrada abordado cada elemento del sistema en una tabla independiente a la cual se llegara mediante un hipervínculo en el índice del documento:

**Tabla 5. índice de catálogo de fallas**

Página	Capítulo	Contenido
<a href="#">1</a>	Pretratamiento	<a href="#">Tabla 01: Bomba centrífuga</a> <a href="#">Tabla 02: Filtro multimedia</a> <a href="#">Tabla 03: Ablandadores</a> <a href="#">Tabla 04: Bomba dosificadora</a> <a href="#">Tabla 05: Tanques de estabilización</a> <a href="#">Tabla 06: Filtro de cartucho</a> <a href="#">Tabla 07: Válvula actuada neumática</a>
<a href="#">2</a>	Generación OI	<a href="#">Tabla 08: Lámpara UV</a> <a href="#">Tabla 09: Bomba de alta presión</a> <a href="#">Tabla 10: Válvula esférica</a> <a href="#">Tabla 11: Módulo de Osmosis Inversa</a> <a href="#">Tabla 12: Módulo de EDI</a> <a href="#">Tabla 13: Válvula de diafragma manual</a> <a href="#">Tabla 14: Válvula de diafragma actuada</a>
<a href="#">3</a>	Distribución	<a href="#">Tabla 15: Tanque de almacenamiento</a> <a href="#">Tabla 16: Bomba centrífuga distribución</a> <a href="#">Tabla 17: Intercambiador de calor</a> <a href="#">Tabla 18: Lámpara UV</a> <a href="#">Tabla 19: Válvula actuada neumática</a> <a href="#">Tabla 20: Línea de distribución</a>
<a href="#">4</a>	Hoja de registro	<a href="#">Tabla 21: Hojas de registro</a>
<a href="#">5</a>	Encuesta	<a href="#">Tabla 22: Encuesta operador de equipo</a>
<a href="#">6</a>	Cálculos de no producción	<a href="#">Tabla 23: Tiempos del mantenimiento</a> <a href="#">Tabla 24: Metas de producción</a> <a href="#">Tabla 25: Perdidas de no producción</a> <a href="#">Tabla 26: Delta de ahorro</a> <a href="#">Tabla 27: Análisis de sensibilidad</a> <a href="#">Tabla 28: Impacto de repuesto</a>

*Fuente. Elaboración propia.*

A partir de la identificación de sistemas y equipos, se desarrollaron los catálogos de fallas correspondientes a cada etapa del proceso, manteniendo en todo momento las directrices entregadas por la normativa para la definición de ítems mantenibles, modos de fallas y acciones de mantenimiento recomendadas. Esta estructura permite estandarizar el registro de eventos de mantenimiento, mejorar la trazabilidad de la información y generar una base de datos para el análisis de tendencias y la toma de decisiones técnicas.

A continuación, se presentan algunas tablas del catálogo de fallas correspondiente a los equipos identificados en el sistema de purificación de agua, el resto de las tablas serán encontradas en los anexos del documento:

## 8.2 MUESTRA DE CATÁLOGOS DE FALLA

Comenzando por el primer equipo que se dispone entrando al sistema de purificación. La bomba centrífuga de alimentación, encargada de alimentar todo el proceso de pretratamiento del sistema, donde se prepara el agua quitando los particulados más grandes y aliviando la carga para el proceso de generación, esto se logra mediante prefiltros, ablandamiento de resinas y dosificación química:

### 8.2.1 Bomba centrífuga de pretratamiento BC-01

*Tabla 6. Catálogo bomba centrífuga BC-01*

TABLA DE FALLAS PARA BOMBA CENTRIFUGA:				BC-01	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Carcasa	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Eje	20	Parada	BRD	Reparar	2
Conjunto de impulsores	30	Producción errática	ERO	Ajustar	4
Sello mecánico	40	Fuga externa - medio del proceso	ELP	Servicio	7
Rodamiento radial (motor)	50	Falla de arranque bajo demanda	FTS	Prueba	8
Rodamiento de empuje (motor)	60	Fuga interna	INL	Inspección	9
Bornes eléctricos del motor	70	Baja producción	LOO	Reacondicionamiento	10
Cables eléctricos del motor	80	Ruido	NOI		
Sensores asociados	90	Sobrecalentamiento	OHE		
Uniones embridadas de la bomba	100	Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Deficiencia estructural	STD		
		Parada espuria	UST		
		Vibración	VIB		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

Comenzando por la sección superior del catálogo, junto al nombre del componente asociado se registra el código o TAG del elemento, es importante definir este código por dos motivos principales. Primero, detallar los niveles taxonómicos correctos en la clasificación de equipos y utilizar ese código en el registro al momento de las averías, permitiendo realizar un seguimiento de su ocurrencia en el tiempo.

Seguido a la tabla, encontramos tres columnas principales. Desde izquierda a derecha, se presenta la sección de ítems mantenibles para la bomba centrífuga, la cual corresponde al nivel taxonómico más bajo que se abordará en el catálogo y es utilizado para responder a la pregunta: ¿Dónde buscar? A continuación del ítem, se detallan los modos de falla asociados a bombas según los documentos de la normativa, entendiendo que aquí se define el modo de falla como la forma en que esta se manifiesta y es detectada, por ejemplo: ruido, sobrecalentamiento, parada súbita, entre otros, según corresponda al equipo.

Y, a modo de cierre de la información presente en los catálogos de fallas, se entrega una acción sugerida de mantenimiento. Esta columna será retroalimentada en la etapa de registro, comparando con las acciones realmente ejecutadas y siendo agregadas en caso de aportar mejoras en la reducción del tiempo de diagnóstico. Mientras más asertiva sea la acción sugerida según corresponda a la situación, menor será el tiempo de diagnóstico asociado a la falla.

### **8.3 EJEMPLO HOJA DE REGISTRO**

Una vez definido y estructurado el catálogo, se hace necesario contar con un formato de registro que permita capturar esta información de manera sistemática durante la operación y el mantenimiento del sistema. En este contexto, el catálogo de fallas actúa como base para la elaboración de la hoja de registro de fallas, la cual permite documentar los eventos ocurridos, facilitar el diagnóstico y generar información histórica para su posterior análisis.

### 8.3.1 Hoja de registro de fallas

*Tabla 7. Hoja de registro de fallas*

REGISTRO ESTANDARIZADO DE FALLAS															
IDENTIFICACIÓN							DATOS DE FALLA								
Identificación del equipo	Fecha de falla	Hora detección de falla	Item (sugerido)	Modo de falla	COD	Acción (sugerida)	Componente / ítem mantenible en falla	Mecanismo de falla	Causa de falla	Método de detección	Actividad ejecutada	Fecha de recuperación	Hora recuperación de equipo	Duración de la falla [h]	Impacto en la operación (Alto/Medio/Bajo)
BC-01	01-03-2025	9:30:00	Sello mecánico	Baja producción	LOO	Reemplazar	Sello mecánico	Desgaste mecánico	Mantenimiento insuficiente	Alarma de baja presión		01-03-2025	18:00	8,5	

*Fuente. Elaboración propia.*

En la hoja de registro adjunta se encuentra un ejemplo de carácter ilustrativo que busca demostrar cómo debe ser el registro de la información en el documento, además apreciamos su relación con la información proporcionada por el catálogo de fallas visto previamente.

Como se observa al comienzo, el ítem de “IDENTIFICACIÓN” debe ser completado por el operador o la persona que detecte la avería en ese momento. Este punto es clave, ya que, luego de ser comunicada la información de identificación al equipo de mantenimiento, estos proceden a realizar su diagnóstico, utilizando como guía y primeros ítems plausibles a revisar los detallados en la

información preliminar. Aquí radica la importancia de la información registrada en base al catálogo, ya que permite reducir el proceso cognitivo basado en la experiencia o conocimientos propios de los mantenedores, revisando directamente en un solo lugar, y en base al procedimiento

Ahora, analizando la sección “DATOS DE FALLA”, encontramos toda la información que debe ser completada por el personal de mantenimiento que recuperó la función perdida, donde detallará de forma precisa la causa real de la falla junto con la actividad ejecutada. En este punto se cierra el contenido planteado por el catálogo y la normativa, sin embargo, es importante mencionar que esta hoja se complementa para llevar más allá el registro de fallas, aportando con la información necesaria para el análisis de tendencias de mantenimiento, en las cuales, si no existe un registro de eventos, tiempos y actividades, resulta imposible efectuar buenos diagnósticos. Aquí entran en función los demás apartados dirigidos a complementar la base de datos con información altamente requerida.

## **9 EVALUACIÓN TÉCNICO-OPERATIVA**

El presente capítulo responde al objetivo específico N°3, el cual consiste en evaluar el impacto del catálogo de fallas en la gestión del mantenimiento. Para ello, se desarrolla un análisis técnico-operacional orientado a estimar la influencia de la propuesta en los tiempos de diagnóstico y reparación, con el fin de determinar posibles mejoras en la disponibilidad del sistema.

### **9.1 Introducción a evaluación operativa**

La implementación de un catálogo de falla y una hoja de registro estandarizada basadas en la norma ISO 14224, no solo logra ordenar y mejorar la calidad de la información, sino que también es capaz de llevar a relucir datos de fallas que no se mantienen en plena consideración. En sistemas de alto impacto operacional, como el sistema de purificación de

agua, una mejora en la disponibilidad de la información y registro de fallas puede conectarse con reducciones en el tiempo de diagnóstico.

En este contexto, el presente capítulo tiene por objetivo analizar, desde una perspectiva técnico-operativa, el impacto que puede generar la aplicación del sistema de registro propuesto. El análisis se enfoca principalmente en la disminución del tiempo empleado en diagnosticar la falla, la reducción de las pérdidas asociadas a indisponibilidad, y un enfoque en los tiempos derivados de una falla que generan mayor impacto en la indisponibilidad del sistema.

De esta manera, la evaluación operativa permite complementar el enfoque metodológico de la propuesta, entregando una justificación cuantitativa del aporte entregado por el catálogo de fallas y del sistema de registro desarrollado, y además su contribución en la gestión del mantenimiento dando a conocer de manera visual valores de alto impacto de interés para la organización.

## **9.2 Levantamiento de información y supuestos**

Como se puede esperar, para el análisis de efectividad del catálogo y del registro son necesarios datos. Al no contar con el tiempo necesario para su implementación y la aplicación de datos registrados, se optó por realizar una entrevista al operador actual del equipo para obtener la información proporcionada por su pericia en el tema y convivencia diaria con el equipo. Es importante mencionar que el operador ostenta más de 10 años de experiencia operando equipos similares, validando la información proporcionada a continuación:

**Tabla 8. Entrevista operador**

	EQUIPOS	¿Detiene la producción?	T. de diagnóstico [h]		T. de reparación [h]		¿Tiene repuestos?	T. de espera (repuestos)	
			Max [h]	Min [h]	Max [h]	Min [h]		NO	Valor
PRE-TRATAMIENTO	Tabla 01: Bomba centrífuga	✓	1	0,5	8	4	✓	1	Mes
	Tabla 02: Filtro multimedia	✓	1	0,25	8	5	✓	3	Semanas
	Tabla 03: Ablandadores	✓	1	0,25	8	5	✓	3	Semanas
	Tabla 04: Bomba dosificadora	x	-	-	-	-	x	-	-
	Tabla 05: Tanques de estabilización	x	-	-	-	-	✓	-	-
	Tabla 06: Filtro de cartucho	x	-	-	-	-	x	-	-
GENERACIÓN (OI)	Tabla 07: Válvula actuada neumática	✓	1	0,5	2	1	✓	1	Mes
	Tabla 08: Lámpara UV	x	-	-	-	-	x	-	-
	Tabla 09: Bomba de alta presión	✓	2	1	8	6	✓	1	Mes
	Tabla 10: Válvula esférica	x	-	-	-	-	✓	-	-
	Tabla 11: Módulo de Osmosis Inversa	✓	1	0,5	8	4	✓	-	-
	Tabla 12: Módulo de EDI	✓	-	-	-	-	✓	-	-
DISTRIBUCIÓN	Tabla 13: Válvula de diafragma manual	✓	0,5	0,25	2	1	✓	1	Día
	Tabla 14: Válvula de diafragma actuada	✓	1	0,5	2	1	✓	1	Día
	Tabla 15: Tanque de almacenamiento	x	-	-	-	-	✓	-	-
	Tabla 16: Bomba centrífuga distribución	✓	1	0,5	8	4	✓	2	Mes
	Tabla 17: Intercambiador de calor	x	-	-	-	-	✓	-	-
	Tabla 18: Lámpara UV	x	-	-	-	-	x	-	-
	Tabla 19: Válvula actuada neumática	✓	1	0,5	2	1	✓	1	Mes
	Tabla 20: Línea de distribución	x	-	-	-	-	x	-	-

**Fuente. Elaboración propia.**

Como se observa en la tabla adjunta se abordaron todos los equipos presentados en el catálogo y divididos según el subproceso al que corresponde, los campos y criterios abordados en la entrevista consistieron en lo siguiente:

1. Preguntar al operador del equipo si la falla más crítica del componente detendría la producción del sistema. Se omiten los fallos funcionales de los equipos, debido a que no detienen el proceso productivo, sino que simplemente lo hacen menos eficiente, y su reparación es relativamente ambulatoria. Además, fueron eliminados los equipos cuyo fallo es demasiado remoto de ocurrir, como el tanque de almacenamiento, el intercambiador de calor o el módulo EDI.
2. Seguido por consultar un tiempo máximo y mínimo estimado de diagnóstico y reparación para aquellos componentes que sí afectan la indisponibilidad del sistema, con el fin de realizar posteriormente una evaluación en escenarios

optimista y pesimista ante una falla. En el peor de los casos, se asigna el tiempo máximo de reparación junto con el tiempo de espera por repuestos, aspecto que será abordado a continuación.

3. Como tercer ítem de interés, se consultó si dicho equipo contaba con repuestos clave para su restauración. Esta pregunta resulta fundamental, ya que evidencia la falta de repuestos en sistemas críticos, los cuales en su mayoría deben ser solicitados al extranjero. Según las palabras y la experiencia del operador, la llegada de estos repuestos puede tardar entre uno y dos meses, en el mejor de los casos.

### **9.3 Consideración coeficiente de reducción “r”**

Previo a la presentación de los resultados, es indispensable aclarar la magnitud de la reducción de tiempo considerada en el caso de aplicar el catálogo y el registro de fallas. Tal como se mencionó anteriormente, no se dispone de información histórica suficiente que permita establecer un parámetro de reducción del tiempo de diagnóstico. Debido a ello, se optó por aplicar un factor de reducción con un valor del 20 %.

Este porcentaje fue seleccionado en base a un caso de estudio donde fue aplicada la metodología RCA, en el cual se obtuvieron mejoras estimadas de un 50% en la reducción de fallos (Anchundia, Navia, & Litardo, 2022). No obstante, dicha metodología prioriza y concentra los recursos en los equipos o modos de falla de mayor riesgo, lo que puede generar impactos más localizados y significativos. En contraste, el catálogo de fallas propuesto tiene un alcance transversal a todo el sistema, constituyéndose como una herramienta base para la estructuración y alimentación de la información necesaria para análisis posteriores más específicos.

Considerando estas diferencias, se decidió adoptar un valor conservador para el factor de reducción, con el fin de no sobreestimar el impacto de la implementación del catálogo de fallas en la disminución de los tiempos de diagnóstico.

**Tabla 9. Factor de reducción r**

<b>Factor reducción diagnóstico "r"</b>	20%
---	-----

*Fuente. Elaboración propia.*

Una vez aclarada la naturaleza de la entrevista y la información obtenida, se procede a tabular de forma ordenada, identificando los ítems que serán considerados en el análisis. A continuación, se muestra dos tablas asociadas a los tiempos de la situación actual y situación propuesta:

**Tabla 10. Situación actual**

EQUIPOS	Diagnóstico		Reparación		Espera (repuestos)			Sanitización
	Max [h]	Min [h]	Max [h]	Min [h]	Valor	Unidad	Tiempo [h]	Tiempo [h]
Bomba centrífuga	1	0,5	8	4	1	Mes	160	8
Filtro multimedia	1	0,25	8	5	3	Semanas	120	8
Ablandadores	1	0,25	8	5	3	Semanas	120	8
Válvula actuada neumática	1	0,5	2	1	1	Mes	160	8
Bomba de alta presión	2	1	8	6	1	Mes	160	8
Módulo de Ósmosis Inversa	1	0,5	8	4				8
Válvula de diafragma manual	0,5	0,25	2	1	1	Día	8	8
Válvula de diafragma actuada	1	0,5	2	1	1	Día	8	8
Bomba centrífuga de distribución	1	0,5	8	4	1	Mes	160	8
Válvula actuada neumática	1	0,5	2	1	1	Mes	160	8

*Fuente. Elaboración propia.*

**Tabla 11. Situación propuesta**

EQUIPOS	Diagnóstico		Reparación		Espera (repuestos)			Sanitización
	Max [h]	Min [h]	Max [h]	Min [h]	Valor	Unidad	Tiempo [h]	Tiempo [h]
Bomba centrífuga	0,8	0,4	8	4	1	Mes	160	8
Filtro multimedia	0,8	0,2	8	5	3	Semanas	120	8
Ablandadores	0,8	0,2	8	5	3	Semanas	120	8
Válvula actuada neumática	0,8	0,4	2	1	1	Mes	160	8
Bomba de alta presión	1,6	0,8	8	6	1	Mes	160	8
Módulo de Ósmosis Inversa	0,8	0,4	8	4				8
Válvula de diafragma manual	0,4	0,2	2	1	1	Día	8	8
Válvula de diafragma actuada	0,8	0,4	2	1	1	Día	8	8
Bomba centrífuga de distribución	0,8	0,4	8	4	1	Mes	160	8
Válvula actuada neumática	0,8	0,4	2	1	1	Mes	160	8
<b>Factor reducción diagnóstico "r"</b>	20%							

*Fuente. Elaboración propia.*

## 9.4 Metas de producción

Una vez determinado el rango de horas para cada situación evaluada, se procede a establecer el parámetro de impacto en el análisis. Para ello, se consultó a la jefatura de la organización respecto a sus proyecciones de ventas anuales, sin embargo, debido a la sensibilidad de dicha información, se facilitaron las metas de producción mensuales, las cuales resultan igualmente factibles para el desarrollo del análisis de impacto.

*Tabla 12. Metas de producción*

<b>Metas de producción mensual</b>	600000	SKU / Mes
<b>Producción diaria</b>	30000	SKU/ Día
<b>Producción x hora</b>	3750	SKU/ Hora

*Fuente. Elaboración propia.*

A partir de esta información, se presentan a continuación las pérdidas de producción asociadas al tiempo de indisponibilidad total definido anteriormente para los componentes del sistema a consideradas para el análisis:

## 9.5 Perdidas de producción por falla

*Tabla 13. Perdidas de producción situación base*

<b>EQUIPOS</b>	<b>Pesimista [h]</b>	<b>Perdidas x falla (productos)</b>	<b>Optimista [h]</b>	<b>Perdidas x falla (productos)</b>
Bomba centrífuga	177	663750	12,5	46875
Filtro multimedia	137	513750	13,25	49688
Ablandadores	137	513750	13,25	49688
Válvula actuada neumática	171	641250	9,5	35625
Bomba de alta presión	178	667500	15	56250
Módulo de Ósmosis Inversa	17	63750	12,5	46875
Válvula de diafragma manual	18,5	69375	9,25	34688
Válvula de diafragma actuada	19	71250	9,5	35625
Bomba centrífuga de distribución	177	663750	12,5	46875
Válvula actuada neumática	171	641250	9,5	35625

*Fuente. Elaboración propia.*

**Tabla 14. Perdidas de producción situación propuesta**

EQUIPOS	Pesimista [h]	Perdidas x falla (productos)	Optimista [h]	Perdidas x falla (productos)
Bomba centrífuga	176,8	663000	12,4	46500
Filtro multimedia	136,8	513000	13,2	49500
Ablandadores	136,8	513000	13,2	49500
Válvula actuada neumática	170,8	640500	9,4	35250
Bomba de alta presión	177,6	666000	14,8	55500
Módulo de Ósmosis Inversa	16,8	63000	12,4	46500
Válvula de diafragma manual	18,4	69000	9,2	34500
Válvula de diafragma actuada	18,8	70500	9,4	35250
Bomba centrífuga de distribución	176,8	663000	12,4	46500
Válvula actuada neumática	170,8	640500	9,4	35250

*Fuente. Elaboración propia.*

## 9.6 Evaluación de impacto productivo

Si observamos a simple vista ambas tablas de resultados, se torna complejo identificar una diferencia significativa entre ambas situaciones. Debido a esto, se realiza una tabla con el diferencial de productos entre ambas situaciones, según corresponda, primero evaluando el tiempo pesimista actual junto al propuesto, y finalizando con el tiempo optimista actual evaluado con el propuesto:

**Tabla 15. Diferencial de productos entre situación actual y caso propuesto**

EQUIPOS	Pesimista	Optimista
Bomba centrífuga	750	375
Filtro multimedia	750	187,5
Ablandadores	750	187,5
Válvula actuada neumática	750	375
Bomba de alta presión	1500	750
Módulo de Ósmosis Inversa	750	375
Válvula de diafragma manual	375	187,5
Válvula de diafragma actuada	750	375
Bomba centrífuga de distribución	750	375
Válvula actuada neumática	750	375

*Fuente. Elaboración propia.*

Ahora observando los datos con mayor claridad entre situaciones, seríamos capaz de mitigar en promedio la pérdida de 787 productos en el escenario pesimista y 356 en promedio para el optimista.

En función de los resultados podemos establecer que son lógicos, debido a que la reducción se aplicó como un valor porcentual sobre un mayor tiempo base. En esta situación, el delta de recuperación de productos es mayor en el caso pesimista, debido a que el factor de reducción se aplicó sobre un tiempo de indisponibilidad más extenso, lo cual no indica que este escenario sea el más favorable.

Si revisamos a detalle las tablas de tiempos, resulta complejo identificar la diferencia aplicando el catálogo, pero su impacto es real, solamente que la reducción del tiempo de diagnóstico tiene un efecto limitado en la indisponibilidad total del sistema, dado que esta es dominada por tiempos de logística, operacionales y sanitización, factores que no son reducibles con el catálogo y el registro. Lo que refuerza su valor como herramienta para el análisis de tendencia y la identificación de repuestos críticos al hacernos evidente esa deficiencia.

A continuación, se adjunta tabla que respalda la dominancia en el tiempo de indisponibilidad por parte de los repuestos críticos.

**Tabla 16. Impacto en indisponibilidad por repuestos**

<b>EQUIPOS</b>	<b>T.Espera</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>% de impacto</b>
Bomba centrífuga	160	177	90%
Filtro multimedia	120	137	88%
Ablandadores	120	137	88%
Válvula actuada neumática	160	171	94%
Bomba de alta presión	160	178	90%
Módulo de Ósmosis Inversa	0	17	0%
Válvula de diafragma manual	8	18,5	43%
Válvula de diafragma actuada	8	19	42%
Bomba centrífuga de distribución	160	177	90%
Válvula actuada neumática	160	171	94%

**Fuente. Elaboración propia.**

## 9.7 Análisis de sensibilidad

Al realizar el análisis de sensibilidad sobre la situación propuesta, se observa que los resultados presentan un comportamiento proporcional frente a variaciones en el factor de reducción del tiempo. En escenarios con un factor de reducción del 30 %, el impacto positivo aumenta de manera consistente, mientras que al considerar un factor más conservador del 10 % el efecto disminuye en la misma proporción. Este comportamiento confirma que la metodología de cálculo empleada es correcta y estable frente a cambios en los supuestos iniciales.

Asimismo, el análisis permite identificar que el mayor impacto en la indisponibilidad, bajo el escenario pesimista, se encuentra asociado principalmente a la gestión de repuestos críticos, mientras que en el escenario optimista la mayor influencia corresponde a los tiempos requeridos para las sanitizaciones obligatorias posteriores a una intervención. Estos resultados refuerzan la validez del enfoque utilizado y permiten focalizar las oportunidades de mejora en los factores que más inciden en la disponibilidad del sistema.

*Tabla 17. Analisis de sensibilidad para factor de reducción*

Valor Factor de reducción EQUIPOS	r =30%		r =20%		r =10%	
	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista
Bomba centrífuga	1125	562,5	750	375	375	187,5
Filtro multimedia	1125	281,25	750	188	375	93,75
Ablandadores	1125	281,25	750	188	375	93,75
Válvula actuada neumática	1125	562,5	750	375	375	187,5
Bomba de alta presión	2250	1125	1500	750	750	375
Módulo de Ósmosis Inversa	1125	562,5	750	375	375	187,5
Válvula de diafragma manual	562,5	281,25	375	188	187,5	93,75
Válvula de diafragma actuada	1125	562,5	750	375	375	187,5
Bomba centrífuga de distribución	1125	562,5	750	375	375	187,5
Válvula actuada neumática	1125	562,5	750	375	375	187,5

*Fuente. Elaboración propia.*

## **10 CONCLUSIONES**

Para dar cierre al presente trabajo de titulación, se exponen a continuación las principales conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del estudio, estableciendo una relación directa con los objetivos planteados al inicio de este.

### **10.1 CONCLUSIONES PRINCIPALES**

El presente trabajo de título permitió cumplir con el objetivo general propuesto, consistente en desarrollar un catálogo de fallas basado en la norma ISO 14224 para el sistema de ósmosis inversa. Dicho objetivo se alcanzó mediante la correcta aplicación de los lineamientos de la norma, integrando además conocimientos previos asociados a metodologías de mantenimiento como el FMEA, la cual sirvió como referencia conceptual para estructurar el registro y clasificación de la información de fallas.

El catálogo de fallas desarrollado proporciona un aporte metodológico relevante, ya que establece una estructura estandarizada para el registro de fallas, permitiendo describir de forma clara el elemento afectado, el modo de falla, la causa asociada y las acciones de mantenimiento recomendadas y ejecutadas. Esta estandarización facilita la trazabilidad de la información y reduce la dependencia exclusiva de la experiencia individual para el diagnóstico de fallas. Como sustento de lo anterior, durante el desarrollo del trabajo se evidenció una falencia en el registro de la información y en la existencia de una base de datos que permitiera nutrir de manera fidedigna un análisis en profundidad de tendencias de fallas o causas raíz. Esta problemática también ha sido identificada en estudios similares, como el análisis causa raíz aplicado a un equipo de ósmosis inversa en un centro comercial, donde se concluye la necesidad de contar con información estructurada y confiable para el desarrollo de este tipo de análisis requiriendo implementar estimaciones en las frecuencias de fallas, (Anchundia et al., 2022).

El uso del catálogo y de la hoja de registro demuestra un potencial real de reducción en los tiempos de diagnóstico y reparación, lo que se traduce en una disminución de la indisponibilidad del sistema. Si bien la evaluación realizada se basa en escenarios estimados, apoyados en la experiencia del operador y en un factor de reducción conservador, es justamente en este punto donde la propuesta adquiere valor, al permitir establecer una base de registro estructurada y confiable que visibiliza las fallas y su duración. De esta manera, se contribuye positivamente a la gestión del mantenimiento, sentando las bases para el desarrollo de análisis de mantenimiento con mayor certeza.

## **10.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS**

- En relación con el objetivo específico N°1, este fue cumplido, logrando identificar y describir los equipos involucrados en la producción de agua purificada, estableciendo su función dentro del sistema de ósmosis inversa. Esta identificación permitió comprender la conexión entre los distintos subsistemas y reconocer aquellos componentes con mayor influencia en la continuidad operativa del proceso.
- En relación con el objetivo específico N°2, este fue cumplido, desarrollando un catálogo de fallas estructurado conforme a la norma ISO 14224, logrando estandarizar el registro y la clasificación de eventos de mantenimiento. Este catálogo de fallas permite mejorar la trazabilidad de la información y genera una base sólida para la recopilación de datos de fallas.
- En relación con el objetivo específico N°3, este fue parcialmente cumplido, dado que la evaluación se realizó mediante escenarios estimados y bajo un enfoque conservador. No obstante, los resultados obtenidos evidencian el potencial del catálogo de fallas para reducir los tiempos de diagnóstico y reparación. Asimismo, se identifica un impacto en el indicador MWT, asociado al tiempo de espera de repuestos, al poner en evidencia su influencia en los tiempos de inactividad, lo que permite reconocer oportunidades de mejora en la gestión logística y contribuir al aumento de la disponibilidad del sistema. En este sentido, se concluye que la implementación del catálogo de fallas es una herramienta efectiva para fortalecer la gestión del mantenimiento.

## 11 RECOMENDACIONES

### 1. Implementar hoja de registro de fallas:

El factor más relevante en la toma de decisiones en mantenimiento, tanto correctivo como preventivo, es la información. Por ello, se recomienda documentar sistemáticamente los datos asociados a las averías en la hoja de registro, con el fin de generar una base de datos sólida y confiable. Esta implementación permitirá reducir los tiempos de respuesta ante fallas recurrentes, facilitando la aplicación de soluciones previamente registradas.

### 2. Gestión de repuestos clave:

Se recomienda mejorar la gestión de repuestos clave aplicando el principio de Pareto, identificando componentes de alto impacto, como las bombas centrífugas BC-01 y BAP-101. Estos elementos pueden generar más del 80% del tiempo de inactividad, principalmente debido a los tiempos de reposición, por lo que su adecuada gestión permitirá reducir significativamente la indisponibilidad del sistema en caso de fallas.

### 3. Aplicar análisis de causa raíz (RCA) con datos reales:

Una vez que las fallas han sido registradas de manera sistemática, identificando el componente afectado, su modo de falla, la frecuencia de ocurrencia y los tiempos de recuperación, es posible desarrollar análisis de confiabilidad con un mayor nivel de precisión. Esto permite obtener resultados más confiables y tomar decisiones más asertivas, basadas en datos reales y representativos del comportamiento del sistema.

### 4. Actualizar constantemente el catálogo y la hoja de registro:

A medida que la base de datos se vuelve más completa y robusta, se incrementa la calidad de los análisis y la efectividad en la toma de decisiones, al abarcar una mayor cantidad de escenarios posibles. De esta manera, el sistema de registro se alinea con un enfoque de mejora continua, permitiendo optimizar progresivamente la gestión del mantenimiento en función del tiempo y de la experiencia acumulada.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- British Standards Institution. (2016). *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural: Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)*. British Standards Institution.
- Knop S.A. (2024). *Catálogo general de equipos del sistema de purificación de agua* [Documento interno].
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-centered maintenance*. United Airlines for the Office of the Assistant Secretary of Defense (Manpower, Reserve Affairs, and Logistics).
- Pistarelli, O. (2010). *Manual de mantenimiento*. Talleres Gráficos R y C.
- Anchundia, P., Navia, F., & Litardo, J. (2022). *Análisis causa raíz de fallas (RCFA – Root Cause Failure Analysis). Caso de estudio: Planta de ósmosis inversa / centro comercial* [Tesis de maestría].
- Knop Laboratorios. (s.f.). *Manual de operaciones básicas: Equipo de agua purificada IPA 2 N°466* [Manual técnico interno].
- Troffé, M. (s.f.). *Análisis ISO 14224 / OREDA. Relación con RCM-FMEA*
- Medina, R. (2013). *Experiencias en la elaboración de un catálogo de fallas*. PDVSA.

## 13 ANEXOS

En este apartado del documento se procede a adjuntar todos los catálogos correspondientes a cada componente del sistema, conservando el orden desde pretratamiento a distribución.

### 13.1 Filtro multimedia

*Tabla 18. Catálogo filtro multimedia*

TABLA DE FALLAS PARA FILTRO MULTIMEDIA				FM-01	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Medio filtrante	20	Parada	BRD	Reparar	2
Tubo elevador	30	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Ajustar	4
Válvula de control automática	40	Falla de conexión	FCO	Servicio	7
Motor del cabezal de control	50	Falla de desconexión	FTD	Prueba	8
Placa de control electrónica	60	Falla de funcionamiento	FTI	Inspección	9
Display	70	Falla en el arranque bajo demanda	FTS		
Cableado eléctrico del sistema	80	Fuga interna	INL		
Válvula bypass	90	Reducción de carga	LOA		
Instrumentación asociada (manómetro)	100	Baja producción	LOO		
		Ruido	NOI		
		Sobrecalentamiento	OHE		
		Otro	OTH		
		Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		

*Fuente. Elaboración propia.*

### 13.2 Ablandadores

*Tabla 19. Ablandadores*

TABLA DE FALLAS PARA ABLANDADORES				ABL01/02	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo / tanque del ablandador	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Lecho de grava soporte	20	Parada	BRD	Reparar	2
Resina de intercambio iónico	30	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Ajustar	4
Placas colectoras	40	Falla de conexión	FCO	Servicio	7
Tubo elevador	50	Falla de desconexión	FTD	Prueba	8
Válvula de control automática	60	Falla de funcionamiento	FTI	Inspección	9
Motor del cabezal de control	70	Falla en el arranque bajo demanda	FTS		
Placa de control electrónica	80	Fuga interna	INL		
Display / panel de control	90	Reducción de carga	LOA		
Cableado eléctrico del sistema	100	Baja producción	LOO		
Tanque de salmuera	110	Ruido	NOI		
Válvula de salmuera	120	Sobrecalentamiento	OHE		
		Otro	OTH		
		Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		

*Fuente. Elaboración propia.*

### 13.3 Bomba dosificadora

*Tabla 20. Bombas dosificadoras*

TABLA DE FALLAS PARA BOMBAS DOSIFICADORAS				BD001/002	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Carcasa	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Accionador electromagnético	20	Parada	BRD	Reparar	2
Diafragma	30	Producción errática	ERO	Ajustar	4
Válvula de succión	40	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Servicio	7
Válvula de descarga	50	Falla en el arranque bajo demanda	FTS	Prueba	8
Sellos	60	Fuga interna	INL	Inspección	9
Unidad de control	70	Baja producción	LOO		
Suministro de energía interna (s)	80	Ruido	NOI		
Cableado y conectores eléctricos	90	Sobrecalentamiento	OHE		
Uniones	100	Desviación de parámetros	PDE		
Soporte	110	Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Deficiencia estructural	STD		
		Parada espuria	UST		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

### 13.4 Tanque de estabilización

*Tabla 21. Tanque de estabilización*

TABLA DE FALLAS PARA TANQUE DE ESTABILIZACIÓN				TQ001/002	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo	10	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reemplazar	1
Tapa	20	Desviación de parámetros	PDE	Servicio	7
		Deficiencia estructural	STD	Inspección	9
		Problemas menores en servicio	SER		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.5 Filtro de cartucho

*Tabla 22. Filtro de cartucho*

TABLA DE FALLAS PARA FILTRO DE CARTUCHO				HF01/02	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Carcasa del filtro	10	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reemplazar	1
Tapa del filtro	20	Fuga interna	INL	Servicio	7
Junta / O-ring de sellado	30	Taponamiento / atascamiento	PLU	Inspección	9
Cartucho filtrante	40	Baja producción	LOO		
Conexiones de entrada y salida	50	Desviación de parámetros	PDE		
		Deficiencia estructural	STD		
		Problemas menores en servicio	SER		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.6 Válvula actuada neumática

*Tabla 23. Válvula actuada neumática*

TABLA DE FALLAS PARA VALVULA ACTUADA NEUMATICA				VMA101 - VA101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo de la válvula	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Cubierta / bonete	20	Parada	BRD	Reparar	2
Asiento / placa de cierre	30	Operación retrasada	DOP	Ajustar	4
Obturador	40	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Servicio	7
Sellos / empaquetaduras	50	Fuga externa – medio de suministro	ELU	Inspección	9
Pistón del actuador	60	Falla en cierre bajo demanda	FTC		
Muelle de retorno	70	Falla en funcionamiento bajo demanda	FTF		
Electroválvula de pilotaje	80	Falla en abrir bajo demanda	FTO		
Uniones y conexiones al proceso	90	Fuga interna	INL		
Conexiones neumáticas	100	Ruido	NOI		
		Baja producción	LOO		
		Fuga en posición cerrada	LCP		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.7 Lámpara UV

*Tabla 24. Lámpara UV*

TABLA DE FALLAS PARA LAMPARA UV				UV-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Lámpara UV	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Vaina tubular de cuarzo	20	Parada	BRD	Reparar	2
Junta tórica	30	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Servicio	7
Sensor UV	40	Producción errática	ERO	Prueba	8
Controlador electrónico	50	Falla en funcionamiento bajo demanda	FTF	Inspección	9
Display	60	Baja producción	LOO		
Base/conector de lámpara	70	Otro	OTH		
Cableado eléctrico	80				
Tuercas y elementos de fijación	90				

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.8 Bomba de alta presión

*Tabla 25. Bomba de alta presión*

TABLA DE FALLAS PARA BOMBA DE ALTA PRESIÓN				BAP-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Carcasa	10	Parada	BRD	Reemplazar	1
Conjunto de impulsores	20	Falla en el arranque bajo demanda	FTS	Reparar	2
Eje	30	Baja producción	LOO	Ajustar	4
Cierre mecánico	40	Producción errática	ERO	Servicio	7
Rodamiento radial	50	Fuga interna	INL	Prueba	8
Rodamiento de empuje	60	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Inspección	9
Motor eléctrico	70	Ruido	NOI	Reacondicionamiento	10
Bornes eléctricos del motor	80	Sobrecalentamiento	OHE		
Cableado eléctrico del motor	90	Desviación de parámetros	PDE		
Sensores asociados	100	Taponamiento / atascamiento	PLU		
Uniones embridadas	110	Vibración	VIB		
		Deficiencia estructural	STD		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.9 Válvula esférica

*Tabla 26. Válvula esférica*

TABLA DE FALLAS PARA VALVULA ESFERICA				VE 101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo de la válvula	10	Parada	BRD	Reemplazar	1
Esfera	20	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reparar	2
Asientos	30	Fuga externa – medio de suministro	ELU	Ajustar	4
Vástago	40	Fuga interna	INL	Servicio	7
Empaquetadura del vástago	50	Falla en cierre bajo demanda	FTC	Inspección	9
Sellos (PTFE)	60	Falla en abrir bajo demanda	FTO		
Arandela de empuje	70	Taponamiento / atascamiento	PLU		
Tuerca de retención	80	Baja producción	LOO		
Dispositivo de traba	90	Ruido	NOI		
Mango	100	Otro	OTH		
Uniones embridadas / roscadas	110				

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.10 Módulo de osmosis inversa

*Tabla 27. Módulo de osmosis inversa*

TABLA DE FALLAS PARA MEMBRANA DE OI				OI 101 / 2	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Membrana de ósmosis inversa	10	Baja producción	LOO	Reemplazar	1
Tubo de presión	20	Producción errática	ERO	Servicio	7
Sellos de extremo	30	Desviación de parámetros	PDE	Prueba	8
		Fuga interna	INL	Inspección	9
		Fuga externa – medio del proceso	ELP		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.11 Módulo EDI

*Tabla 28. Módulo EDI*

TABLA DE FALLAS PARA MODULO EDI				EDI-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Módulo EDI	10	Baja producción	LOO	Reemplazar	1
Conexiones hidráulicas del módulo	20	Desviación de parámetros	PDE	Servicio	7
Sellos	30	Fuga interna	INL	Prueba	8
Sistema eléctrico de alimentación CC	40	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Inspección	9
Cableado eléctrico del módulo	50	Taponamiento / atascamiento	PLU		
Sensores asociados (conductividad / presión / caudal)	60	Parada	BRD		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.12 Válvula de diafragma manual

*Tabla 29. Válvula de diafragma manual*

TABLA DE FALLAS VALVULA DE DIAFRAGMA MANUAL				VDM-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo de la válvula	10	Parada	BRD	Reemplazar	1
Diafragma	20	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reparar	2
Asiento	30	Fuga interna	INL	Ajustar	4
Vástago	40	Falla en cierre bajo demanda	FTC	Reequipamiento	5
Empaquetadura / sellos	50	Falla en abrir bajo demanda	FTO	Revisión	6
Volante / manilla manual	60	Taponamiento / atascamiento	PLU	Servicio	7
Conexiones / uniones al proceso	70	Baja producción	LOO	Prueba	8
		Ruido	NOI	Inspección	9
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.13 Válvula de diafragma actuada

*Tabla 30. Válvula de diafragma actuada*

TABLA DE FALLAS VALVULA DE DIAFRAGMA ACTUADA				VDA-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo de la válvula	10	Parada	BRD	Reemplazar	1
Diafragma	20	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reparar	2
Asiento	30	Fuga interna	INL	Modificar	3
Vástago	40	Falla en cierre bajo demanda	FTC	Ajustar	4
Empaquetadura / sellos	50	Falla en abrir bajo demanda	FTO	Reequipamiento	5
Actuador neumático	60	Taponamiento / atascamiento	PLU	Revisión	6
Pistón neumático	70	Baja producción	LOO	Servicio	7
Resorte de retorno	80	Ruido	NOI	Prueba	8
Suministro de aire	90	Otro	OTH	Inspección	9
Conexiones / uniones al proceso	100				

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.14 Tanque de almacenamiento

*Tabla 31. Tanque de almacenamiento*

TABLA DE FALLAS VALVULA DE DIAFRAGMA MANUAL				TQ-101	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo del tanque	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Boquillas de entrada	20	Parada	BRD	Reparar	2
Boquillas de salida	30	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reequipamiento	5
Conexiones y uniones	40	Fuga externa – medio de suministro	ELU	Servicio	7
Filtro de Venteo	50	Fuga interna	INL	Inspección	9
Instrumentación asociada (nivel / presión)	60	Baja producción	LOO		
Soportes	70	Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Acumulación de lodo	SBU		
		Problemas menores en servicio	SER		
		Deficiencia estructural	STD		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.15 Bomba centrífuga de distribución

*Tabla 32. Bomba centrífuga de distribución*

TABLA DE FALLAS PARA BOMBA CENTRIFUGA				BC-201	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Carcasa	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Eje	20	Parada	BRD	Reparar	2
Conjunto de impulsores	30	Producción errática	ERO	Ajustar	4
Sello mecánico	40	Fuga externa - medio del proceso	ELP	Servicio	7
Rodamiento radial (motor)	50	Falla de arranque bajo demanda	FTS	Prueba	8
Rodamiento de empuje (motor)	60	Fuga interna	INL	Inspección	9
Bornes eléctricos del motor	70	Baja producción	LOO	Reacondicionamiento	10
Cables eléctricos del motor	80	Ruido	NOI		
Sensores asociados	90	Sobrecalentamiento	OHE		
Uniones embridadas de la bomba	100	Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Deficiencia estructural	STD		
		Parada espuria	UST		
		Vibración	VIB		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.16 Intercambiador de calor

*Tabla 33. Intercambiador de calor*

TABLA DE FALLAS PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR				IC 201	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Soportes	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Cuerpo / carcasa	20	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reparar	2
Tubos	30	Fuga externa – medio de suministro	ELU	Ajustar	4
Sellos (uniones)	40	Transferencia de calor insuficiente	IHT	Revisión	6
Tuberías	50	Fuga interna	INL	Servicio	7
Válvulas	60	Falla de funcionamiento	FTI	Prueba	8
Sensores de temperatura	70	Baja producción	LOO	Inspección	9
Sensores de presión	80	Sobrecalentamiento	OHE	Reacondicionamiento	10
		Desviación de parámetros	PDE		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Problemas menores en servicio	SER		
		Deficiencia estructural	STD		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.17 Lámpara UV distribución

*Tabla 34. Lámpara UV distribución*

TABLA DE FALLAS PARA LAMPARA UV				UV-201	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Lámpara UV	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Vaina tubular de cuarzo	20	Parada	BRD	Reparar	2
Junta tórica	30	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Servicio	7
Sensor UV	40	Producción errática	ERO	Prueba	8
Controlador electrónico	50	Falla en funcionamiento bajo demanda	FTF	Inspección	9
Display	60	Baja producción	LOO		
Base/conector de lámpara	70	Otro	OTH		
Cableado eléctrico	80				
Tuercas y elementos de fijación	90				

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.18 Válvula actuada neumática

*Tabla 35. Válvula actuada neumática*

TABLA DE FALLAS PARA VALVULA ACTUADA NEUMATICA				VA-201	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Cuerpo de la válvula	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Cubierta / bonete	20	Parada	BRD	Reparar	2
Asiento / placa de cierre	30	Operación retrasada	DOP	Ajustar	4
Obturador	40	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Servicio	7
Sellos / empaquetaduras	50	Fuga externa – medio de suministro	ELU	Inspección	9
Pistón del actuador	60	Falla en cierre bajo demanda	FTC		
Muelle de retorno	70	Falla en funcionamiento bajo demanda	FTF		
Electroválvula de pilotaje	80	Falla en abrir bajo demanda	FTO		
Uniones y conexiones al proceso	90	Fuga interna	INL		
Conexiones neumáticas	100	Ruido	NOI		
		Baja producción	LOO		
		Fuga en posición cerrada	LCP		
		Taponamiento / atascamiento	PLU		
		Otro	OTH		

*Fuente. Elaboración propia.*

## 13.19 Línea de distribución

*Tabla 36. Línea de distribución*

TABLA DE FALLAS PARA LAMPARA UV				UV-201	
ELEMENTOS MANTENIBLES / PARTES	COD	MODO DE FALLA	CÓDIGO (MF)	MEDIDAS GENERALES	COD
Elemento del tubo	10	Lectura anormal en instrumento	AIR	Reemplazar	1
Bridas	20	Fuga externa – medio del proceso	ELP	Reparar	2
Sellos / gaskets	30	Fuga interna	INL	Ajustar	4
Acoplamientos	40	Baja producción	LOO	Reequipamiento	5
Sujetadores / pernos	50	Ruido	NOI	Servicio	7
Soportes de tuberías	60	Desviación de parámetros	PDE	Prueba	8
		Taponamiento / atascamiento	PLU	Inspección	9
		Problemas menores en servicio	SER	Reacondicionamiento	10
		Deficiencia estructural	STD		

*Fuente. Elaboración propia.*