

Aplicación de la metodología RCA (Root Cause Analysis) en sistema de bombeo de planta de tratamiento por Ósmosis Inversa (OI). Caso de estudio: Sector Sanitario (Distribución de agua y tratamiento de aguas servidas).

Application of the RCA (Root Cause Analysis) methodology in a pumping system of reverse osmosis treatment plant. Case study: Sanitary Sector (Distribution of water and treatment of wastewater).

DOI: <https://doi.org/10.82951/5kzp-gk86>

Benjamín Zárate¹, Joaquín Fernández¹, Maximiliano Salazar¹, Jonatan Cortés¹, Carlos Parra¹

¹*Departamento de Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile,*
benjamin.zarate@usm.cl (B.Z), joaquin.fernandezg@usm.cl (J.F.),
maximiliano.salazar@usm.cl (M.S), jonatan.cortesm@usm.cl (J.C),
carlos.parram@usm.cl (C.P.)

Autor de correspondencia: benjamin.zarate@usm.cl

Recibido: Recibido: 8 de diciembre de 2025.

Aprobado: 8 de diciembre de 2025.

Publicado: 25 de marzo de 2026.

Resumen

El presente estudio aplica la metodología de Análisis Causa Raíz (ACR) al sistema de bombeo de alta presión de una planta modular de ósmosis inversa, destinada al tratamiento de agua proveniente de pozo profundo para uso sanitario. El análisis identifica modos de falla recurrentes en los subsistemas de prefiltros, bomba centrífuga multietapa, motor y control, generando pérdidas de presión, detenciones no programadas y variabilidad en el rendimiento del proceso. Entre los principales factores identificados se encuentran la cavitación, el fouling o ensuciamiento acelerado del cartucho filtrante, desviaciones operacionales y deficiencias en la instalación de componentes mecánicos. A través del diagnóstico funcional y del análisis de causas probables, se priorizan los modos de falla utilizando el concepto de Riesgo Total Anualizado (RTA), lo que permite proponer acciones correctivas orientadas a mejorar la confiabilidad operacional, reducir el riesgo operacional y asegurar la continuidad del proceso de ósmosis inversa en la industria sanitaria.

Se describe y analiza lo siguiente:

- El estudio identifica y prioriza los modos de falla más críticos del sistema de bombeo de alta presión mediante el Riesgo Total Anualizado (RTA), determinando que el modo *Cartucho Obstruido* actúa como causa raíz operacional al desencadenar fallas hidráulicas y eléctricas subsecuentes en la bomba multietapa y el motor.
- Se aplica la metodología de Análisis de Causa Raíz (RCA) bajo el modelo de Parra & Crespo, integrando un equipo multidisciplinario, definiendo el problema, validando hipótesis basadas en evidencia y clasificando causas físicas, humanas y latentes para comprender el comportamiento sistémico del activo.
- El análisis propone acciones correctivas y preventivas orientadas a eliminar o mitigar las causas raíz validadas, incluyendo estandarización de procedimientos, capacitación técnica del personal, establecimiento de criterios de cambio basados en condición y creación de un estándar corporativo de filtración para mejorar la estabilidad hidráulica del proceso.

Finalmente, la implementación de estas medidas proyecta una reducción del RTA desde \$58.441.866 CLP a \$2.177.500 CLP o un 96% de reducción, evidenciando una disminución significativa del riesgo operativo, mayor continuidad del proceso de ósmosis inversa y una mejora sustancial en la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárate, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 86
-------------------------------	--	---------

Palabras clave: Ósmosis inversa, sistema de bombeo de alta presión, Análisis de Causa Raíz (ACR), Riesgo Total Anualizado (RTA), cartucho obstruido, cavitación, fouling, confiabilidad operacional, fallas en cascada, mantenimiento industrial.

Abstract (English Version)

This study applies the Root Cause Analysis (RCA) methodology to the high-pressure pumping system of a modular reverse osmosis plant used for the treatment of deep-well water for sanitary purposes. The analysis identifies recurrent failure modes in the subsystems of prefilters, multistage centrifugal pump, motor, and control, leading to pressure losses, unplanned shutdowns, and variability in process performance. The main contributing factors include cavitation, accelerated fouling of the filter cartridge, operational deviations, and deficiencies in the installation of mechanical components. Through functional diagnostics and analysis of probable causes, failure modes are prioritized using the concept of Annualized Total Risk (ATR), allowing the development of corrective actions aimed at improving operational reliability, reducing operational risk, and ensuring the continuity of the reverse osmosis process in the sanitary industry.

The article describes and analyzes the following:

- The study identifies and prioritizes the most critical failure modes of the high-pressure pumping system through the Annualized Total Risk (ATR), determining that the *Clogged Cartridge* mode acts as the dominant operational root cause by triggering subsequent hydraulic and electrical failures in the multistage pump and motor.
- The Root Cause Analysis (RCA) methodology is applied following the Parra & Crespo model, integrating a multidisciplinary team, defining the problem, validating evidence-based hypotheses, and classifying physical, human, and latent causes to understand the systemic behavior of the asset.
- The analysis proposes corrective and preventive actions aimed at eliminating or mitigating validated root causes, including the standardization of procedures, technical training for personnel, the establishment of condition-based replacement criteria, and the creation of a corporate filtration standard to improve hydraulic stability.

Finally, the implementation of these measures projects a reduction of ATR from \$58,441,866 CLP to \$2,177,500 CLP, demonstrating a significant decrease in operational risk, greater continuity of the reverse osmosis process, and a substantial improvement in system reliability and availability.

Keywords: Reverse osmosis, high-pressure pumping system, Root Cause Analysis (RCA), Annualized Total Risk (ATR), clogged cartridge; cavitation, fouling, operational reliability, cascading failures, industrial maintenance.

1. Introducción a la metodología RCA integrada a un modelo de gestión del mantenimiento

La producción de agua potable mediante sistemas de Ósmosis Inversa (OI) se ha convertido en una operación crítica dentro de las empresas sanitarias, en especial en instalaciones modulares que dependen de equipos rotativos de alta exigencia hidráulica para mantener la continuidad del suministro. En estos sistemas, el bombeo de alta presión constituye la etapa central del proceso, ya que permite impulsar el agua proveniente del pozo profundo hacia módulos, donde se reduce la dureza, los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica para cumplir con los límites establecidos por la norma chilena [1], para el agua potable. Por lo tanto,



cualquier desviación operacional en este sistema impacta de manera directa la estabilidad del proceso, el rendimiento y la calidad final del agua tratada.

La planta modular ubicada en Quillota, asociada al sistema productivo “El Cristo”, opera con agua subterránea químicamente estable, pero con presencia puntual de arenas finas y gases disueltos. Debido a la ausencia de un pretratamiento convencional (limitándose únicamente a un pre-filtro de polipropileno), el sistema de bombeo enfrenta variaciones operacionales que pueden generar esfuerzos adicionales, como cavitación, aireación, sobrepresiones, desgaste prematuro de sellos, etc. De igual manera, la instrumentación disponible es básica y no permite un monitoreo avanzado de condición, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a fallas de origen hidráulico.

Considerando que el desempeño del sistema de bombeo condiciona directamente la calidad del agua tratada y la confiabilidad del proceso de OI, se establece la necesidad de aplicar la metodología de Análisis de Causa Raíz (RCA) siguiendo los lineamientos del Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM) y las recomendaciones metodológicas [2]. El objetivo es identificar los modos de falla más significativos, validar hipótesis a partir de evidencia técnica y determinar causas físicas, humanas y latentes, formulando soluciones que permitan mejorar los indicadores clave de mantenimiento: Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y Mantenibilidad (M).

En este marco, el sistema de bombeo de alta presión se somete a la Fase 3 del MGM, correspondiente al RCA, según los lineamientos desarrollados en el modelo integral de gestión [2]. El estudio se orienta a los activos catalogados como críticos a partir de una evaluación cuantitativa de riesgo mediante el indicador RTA, con el propósito de identificar los mecanismos que originan las fallas, validar las causas físicas, humanas y latentes, y establecer acciones que permitan reducir las recurrencias, mejorar el desempeño del sistema y fortalecer la mejora continua dentro del ciclo de gestión del activo.

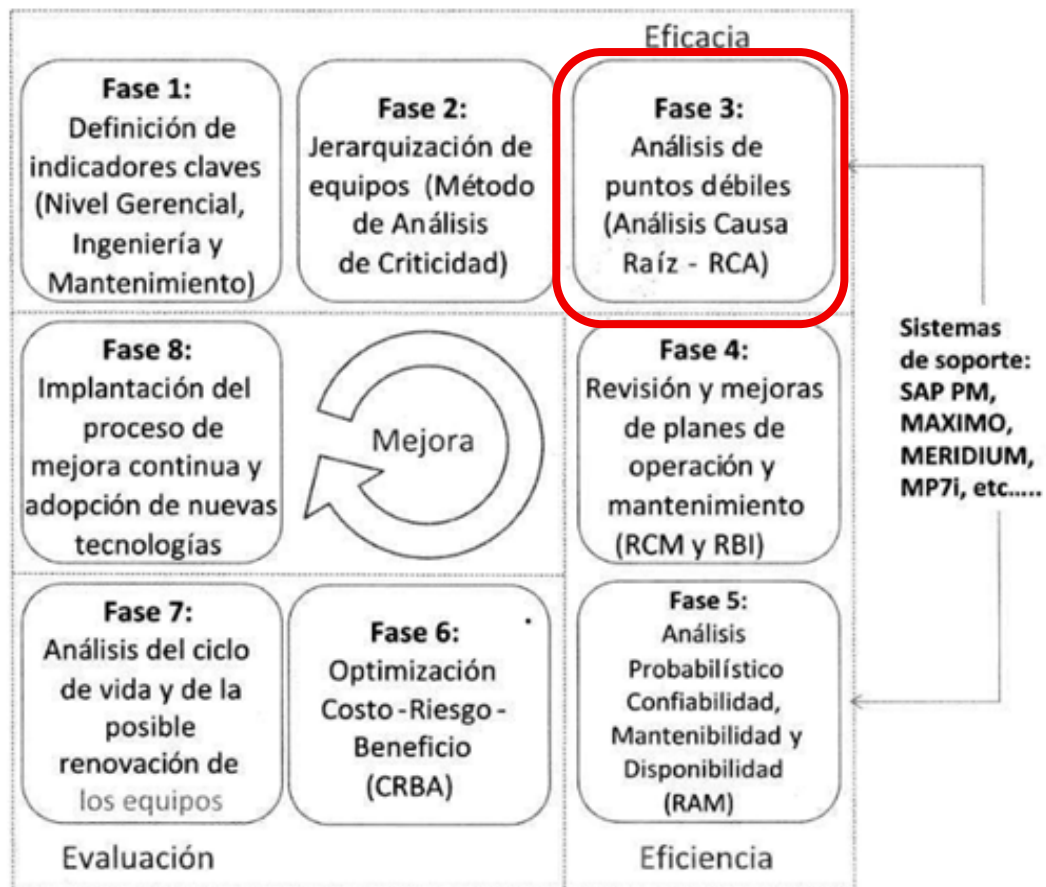


Figura 1. Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) de Parra & Crespo (2015) [2].

2. Marco teórico

Desde un marco teórico, el RCA se sustenta en principios de la ingeniería de sistemas, la gestión de la calidad y la confiabilidad, integrando conceptos como la relación causa/efecto, el pensamiento sistémico y la mejora continua. Metodología como el *Análisis de Árbol de Fallas*, permiten estructurar el proceso de investigación, facilitando la identificación de factores técnicos, humanos, organizacionales y ambientales que interactúan en la ocurrencia de una falla. En el contexto de la ingeniería de mantenimiento, el RCA se posiciona como una herramienta clave para aumentar la confiabilidad operacional, reducir la recurrencia de fallas críticas y optimizar la toma de decisiones, alineándose con los enfoques de mantenimiento proactivo y gestión de activos. Su correcta aplicación contribuye no solo a la solución del problema analizado, sino también al fortalecimiento del aprendizaje organizacional y la mejora del desempeño global del sistema.

2.1. Fundamentos teóricos del proceso de implementación análisis causa raíz (RCA)

El RCA es una metodología estructurada que permite identificar los factores físicos, humanos y latentes que originan un evento de falla. De acuerdo con la literatura [2], el RCA forma parte integral del MGM, ubicándose en la Fase 3, cuyo propósito es comprender por qué ocurrió una falla y establecer soluciones técnicamente justificadas que eliminen o reduzcan la posibilidad de riesgo de falla.

En términos generales, establecen que ninguna organización puede mejorar su confiabilidad sin un proceso formal y disciplinado de análisis de fallas, ya que la mayoría de los eventos operacionales no son producto de un único factor, sino de la interacción entre condiciones del proceso, decisiones humanas y debilidades en los sistemas de gestión [2].

Conceptos de fallo y causa raíz

Los autores [2] definen la falla como “la pérdida de la capacidad de un activo para ejecutar la función que el usuario requiere”, y destacan que todo análisis debe orientarse hacia la función que el equipo deja de cumplir, en lugar de centrarse únicamente en los componentes dañados. En esta línea, una causa raíz es entendida como el conjunto de factores (físicos, humanos o latentes) cuya eliminación evita que la falla vuelva a presentarse bajo las mismas condiciones.

Enfoque sistémico de RCA aplicado

El análisis de fallas debe abordarse desde una perspectiva sistémica, considerando [2]:

- La interacción entre diseño, operación y mantenimiento.
- Las condiciones reales del proceso (presiones, caudales, ciclos, arranques).
- El desempeño histórico del activo.
- Las brechas en procedimientos, entrenamiento y control operacional.

Los autores enfatizan que, sin esta visión general, el análisis termina siendo superficial y no conduce a mejoras reales en confiabilidad.

Tipos de causas: Físicas, Humanas y Latentes

El modelo adopta la clasificación propuesta en la literatura internacional [3, 4], pero la contextualiza dentro del MGM [2]:

Causa Raíz Física (CRF):

Es la condición tangible que provoca el modo de falla físico:

Ejemplos:

- Desgaste.
- Cavitación.
- Corrosión.
- Rotor deformado.
- Sobrepresión.

Causa Raíz Humana (CRH):

Son Conductas o decisiones incorrectas del personal que originan la falla de un equipo o sistema:

Ejemplos:

- Uso inadecuado de herramientas.
- Procedimientos mal ejecutados.
- Operación fuera de parámetros.
- Omisión de tareas de inspección.

Causa Raíz Latente (CRL):

Debilidades del sistema de gestión, que permiten que el error ocurra:

Ejemplos:

- Falta de procedimientos.
- Capacitación insuficiente.
- Mantenciones no planificadas.
- Ausencia de sistemas de control

Este enfoque permite evitar que el análisis se centre en “culpar al operador”, orientándose hacia procesos mejorables, tal como recomienda [2], para organizaciones maduras en gestión de activos.

2.2. Etapas de la metodología RCA según literatura

La Fase 3 del MGM propone una secuencia ordenada de pasos, para este estudio, se aplicará la metodología desarrollada por Parra y Crespo [2, 5 y 6].

La cual considera las siguientes etapas:

1) Conformación del equipo natural de trabajo:

Debe integrar especialistas de mantenimiento, operación, procesos y análisis técnico.

Se seleccionan perfiles que aportan experiencia directa sobre el activo.

2) Definición del problema:

La metodología obliga a responder:

¿Qué ocurrió?

¿Cuándo ocurrió?

¿Dónde ocurrió?

¿Cuál fue el impacto?

La literatura [6], enfatiza que un problema mal definido conduce a un análisis incompleto.

El impacto se cuantifica mediante la expresión general de riesgo propuesta en el MGM:

$$R = FF \times CD + FF \times TPFS \times PEN \quad (1)$$

donde:

FF: frecuencia de fallas (fallos/año)

CD: costo directo por falla (\$/falla)

TPFS: tiempo promedio fuera de servicio (h/falla)

PEN: costo de penalización (\$/h)

3) Identificación y priorización de modos de falla:

El RCA se focaliza en los modos de falla de mayor importancia operacional, determinada mediante indicadores cuantitativos como el RTA:

$$RTA = CAR + PAF \quad (2)$$

donde:

$$CAR = FF \times (CMO + CM) \quad (3)$$

$$PAF = FF \times PE \quad (4)$$

y

$$PE = TR \times IP + SHA \quad (5)$$

CMO: costo de mano de obra.

CM: costo de materiales.

TR: tiempo de reparación.

IP: impacto en producción.

SHA: penalización por seguridad, medio ambiente u operación.

Adicionalmente, tal como recomienda la literatura [2], se aplica el criterio de Pareto (80/20), el cual indica que un número reducido de modos de falla suele concentrar aproximadamente el 80% del costo total del riesgo.

Este enfoque permite que RCA en los modos de falla con mayor impacto técnico y económico.

4) Formulación y validación de hipótesis:

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárate, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 91
-------------------------------	--	---------

Las hipótesis deben sustentarse en evidencia:

- Registros del sistema
- Historial de mantenciones
- Inspecciones visuales
- Mediciones de vibraciones y presión
- Análisis químicos
- Revisión de parámetros de operación.

5) *Identificación de causas raíz:*

A partir de las hipótesis validadas se clasifican causas raíces: físicas (CRF), humanas (CRH) y latentes (CRL). Sólo se consideran como causas raíz aquellas probadas mediante evidencia [6].

6) *Definición de soluciones:*

La literatura [6] enfatizan que una solución debe:

- Prevenir la recurrencia del modo de falla.
- No generar nuevos riesgos.
- Ser técnicamente viable y económicamente justificable.

7) *Evaluación de la efectividad:*

Una vez aplicadas las acciones correctivas y preventivas definidas en el análisis, es necesario verificar si dichas intervenciones realmente generaron mejoras en el desempeño del sistema. De acuerdo con lo descrito en la literatura [6], este proceso debe seguir una secuencia lógica que permita comprobar, con datos objetivos, si las soluciones cumplen con el propósito de reducir fallas, disminuir riesgos y optimizar los costos asociados.

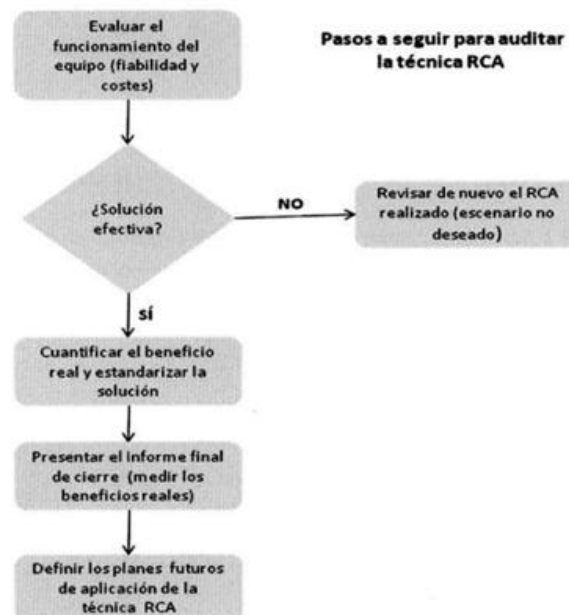


Figura 2. Proceso de validación y auditoría de las soluciones propuestas [2 y 6].

2.3. Medición de la efectividad de las soluciones

Una vez definidas y ejecutadas las acciones de mejora, corresponde evaluar los resultados obtenidos mediante la medición de los siguientes indicadores fundamentales del proceso de mantenimiento, con el fin de determinar si las soluciones implementadas reducen la recurrencia de fallas en el sistema de bombeo de alta presión y mejoran la estabilidad del proceso de OI.

Disponibilidad (A):

$$A = \left(\frac{TPO}{TPO+TPFS} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Confiabilidad (TPO):

$$TPO = \frac{\sum TO}{N \text{ de fallas}} \quad (7)$$

Mantenibilidad (TPFS):

$$TPFS = \frac{\sum TFS}{N \text{ de fallas}} \quad (8)$$

Estos indicadores permiten determinar si las soluciones aplicadas generan una mejora medible en el desempeño del sistema, especialmente en términos de continuidad operativa, estabilidad hidráulica y reducción de detenciones del proceso de OI.

Para la literatura [2], el RCA no es un análisis aislado, sino una herramienta fundamental para:

- Reducir pérdidas por fallas repetitivas.
- Apoyar a la toma de decisiones basadas en riesgo.
- Optimizar costos del ciclo de vida (LCC).
- Mejorar la cultura de mantenimiento.
- Aumentar la madurez organizacional.

Su aplicación en sistemas críticos (como el sistema de bombeo de alta presión en OI), permite gestionar la confiabilidad de los activos de forma proactiva y sustentable.

3. Caso de estudio: Desarrollo del análisis causa raíz al sistema de bombeo OI

En los párrafos siguientes se presenta el caso práctico de aplicación de la metodología presente en la literatura, con el fin de simular un evento real, en el sistema de bombeo de alta presión OI.

La OI es un proceso de separación por membranas ampliamente utilizado en la industria sanitaria para la producción de agua potable a partir de fuentes subterráneas o superficiales. El principio fundamental consiste en la aplicación de una presión hidráulica superior a la presión osmótica natural, obligando al flujo de agua a través de una membrana semipermeable desde una solución más concentrada hacia una menos concentrada, en sentido inverso al fenómeno osmótico tradicional [7].

3.1. Antecedentes: Principios de ósmosis inversa

En términos operacionales, la OI permite remover sólidos disueltos, dureza, conductividad y otras especies químicas mediante la retención selectiva que ejerce la membrana, cuya estructura polimérica presenta porosidad nanométrica capaz de rechazar entre el 95 % y 99 % de los solutos presentes [8]. El rendimiento del proceso depende de variables críticas como la presión de alimentación, el caudal, la temperatura, la concentración iónica y la calidad del pretratamiento del agua.

El flujo de permeado obtenido se expresa comúnmente mediante la relación entre presión transmembrana (TMP) y la resistencia hidráulica de la membrana. La ecuación general del flujo de agua a través de la membrana se expresa como:

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (9)$$

donde:

J_w = flujo de agua (L/m²·h)

A = Coeficiente de permeabilidad

ΔP = presión aplicada

$\Delta \pi$ = presión osmótica [7].

Para plantas sanitarias como la de esta industria, las bombas de alta presión son esenciales, ya que deben entregar una presión suficiente para superar la presión osmótica del agua subterránea, típicamente entre 7 y 12 bar, dependiendo del nivel de sólidos disueltos totales (TDS)[8]. Una presión insuficiente reduce la producción de permeado, mientras que presiones excesivas aceleran el deterioro mecánico de las membranas y del sistema de bombeo. El proceso requiere condiciones hidráulicas estables; fluctuaciones de caudal o presión pueden inducir cavitación, golpes de ariete o fatiga en componentes del sistema de bombeo multietapa, afectando directamente el desempeño de las membranas. Asimismo, fenómenos como fouling (ensuciamiento), scaling (incrustación) o aireación disminuyen la eficiencia y aumentan el consumo energético del proceso [9].

En las plantas modulares de OI utilizadas por empresas sanitarias, el agua proveniente de pozos profundos se pre-filtra mediante un cartucho de polipropileno antes de ingresar a la bomba de alta presión y al rack de membranas. Cuando el pretratamiento es limitado como en instalaciones compactas el sistema queda más expuesto a variaciones en sólidos suspendidos, arenas finas o gases disueltos, aumentando el riesgo operacional y la probabilidad de fallas mecánicas o hidráulicas en el sistema de bombeo.

En síntesis, la OI constituye una tecnología eficiente y confiable para la producción de agua potable, pero su estabilidad depende en gran medida del desempeño del sistema de bombeo, la calidad del pretratamiento y el control de variables operacionales, factores que motivan el análisis causa raíz desarrollado en este estudio.

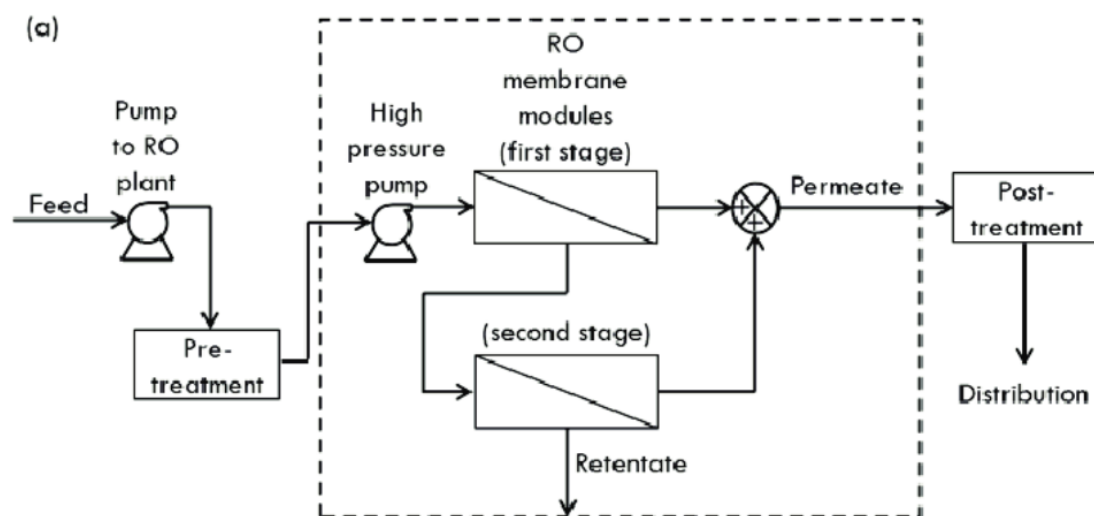


Figura 3. PFD configuración general de un sistema de OI de dos etapas. **Fuente.** Confidencial.

3.2. Contexto operacional en planta modular de tratamiento por ósmosis inversa

El *Sistema Tratamiento* de la planta modular de tratamiento de agua por ósmosis inversa, ubicada en Quillota, Chile, y operada por una empresa sanitaria. Tiene de objetivo reducir los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea principalmente los niveles de nitrato, dureza, sólidos disueltos y conductividad con el fin de cumplir los límites exigidos por la Norma [1], para agua potable.

La instalación trabaja con agua proveniente de pozo profundo, de características químicamente estables, pero con presencia puntual de arenas finas y gases disueltos. Al no disponer de un sistema de pretratamiento convencional, el acondicionamiento previo se limita a un prefiltro de cartucho de polipropileno, que retiene partículas gruesas antes del ingreso al sistema de ósmosis inversa. El proceso se desarrolla en un módulo cerrado que incluye:

Captación de agua de pozo profundo → Prefiltros de polipropileno → Bomba centrífuga vertical multietapas de alta presión → Módulos de membranas de ósmosis inversa → Estanque de elevación.

El sistema de bombeo multietapa, equipado con motor eléctrico vertical y variador de frecuencia (VFD), tiene la función de mantener un caudal de 60 m³/h a una presión nominal constante de 8 bar (± 2 bar según ajuste) hacia los módulos de membranas o rack, según fabricante.

El control de operación se encuentra automatizado mediante señales de nivel de sentina o cámara de succión, de modo que la bomba arranca cuando el nivel supera un umbral alto y se detiene cuando el nivel desciende, antes de alcanzar el límite de succión.

El agua tratada se impulsa hacia el estanque acumulador, desde donde se alimenta al estanque distribuidor y luego su salida red.

Este esquema de control por nivel de sentina previo a la subida al estanque implica arranques y paradas frecuentes que, en conjunto con la ausencia de amortiguadores hidráulicos o válvulas de recirculación mínima, pueden generar transientes de presión, cavitación, golpes de ariete o esfuerzos cíclicos en el conjunto de sellos, cojinetes y etapas hidráulicas. El sistema no dispone de instrumentación avanzada para monitorear vibración, temperatura de cojinetes o NPSH dinámico, por lo que el seguimiento de condición se realiza manualmente. Esto incrementa la susceptibilidad a fallas de tipo hidráulico (cavitación, aireación), mecánico (desalineación, desgaste axial) y operacional (arranques en seco, sobrepresión en descarga).



Figura 4. Bomba Multietapa vertical de alta presión en PMTOI. **Fuente:** Confidencial.

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárata, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 95
-------------------------------	--	---------



Figura 5. Rack de membranas de 8" x 60". **Fuente:** Confidencial.



Figura 6. Porta cartuchos de subsistema de prefiltros length 40 [in], Micron 5 [um]. **Fuente:** Confidencial.

3.3. Conformación del equipo natural de trabajo

Para el desarrollo del RCA se conformó un Equipo Natural de Trabajo (ENT) multidisciplinario, siguiendo los lineamientos del MGM y las buenas prácticas establecidas [2]. La integración de miembros provenientes de mantenimiento, operación y gestión de producción permite contrastar evidencia desde distintas perspectivas del proceso, fortaleciendo la validez técnica del análisis y reduciendo sesgos en la interpretación de los modos de falla.

Es importante señalar que la composición del equipo corresponde a una simulación estructurada con fines académicos, utilizada exclusivamente para el presente estudio. Los roles asignados representan los perfiles funcionales que participarían en un análisis real dentro de una organización industrial, pero no constituyen el equipo formal de la empresa sanitaria referenciada.

El equipo estuvo compuesto por un facilitador y tres especialistas con conocimiento directo del sistema de bombeo de alta presión y del comportamiento operacional de la planta modular de ósmosis inversa.

Tabla 1. ENT simulado con sus respectivos roles. **Fuente:** Elaboración Propia.

Equipo	Rol y/o Función
Benjamín Zárate Cortés	Facilitador metodológico
Jonatan Cortés Montecino	Mantenedor Senior PTOI
Maximiliano Salazar Lucero	Operador Senior Producción
Joaquín Fernández Guerra	Jefe Unidad Producción

La conformación académica del equipo permitió integrar distintas perspectivas técnicas y operacionales del sistema de bombeo de alta presión, asegurando que la identificación de causas raíz se fundamentara en evidencia verificable y en criterios propios de un análisis industrial.

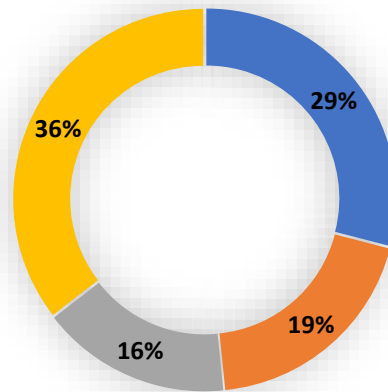
3.4. Definición y jerarquización de eventos “ANTECEDENTES”

Este paso se desarrolla utilizando la experiencia técnica del equipo y los registros históricos de operación de la planta de OI, durante 10 años de funcionamiento de la planta. Al igual que en el documento de referencia, se emplea la información recopilada de los eventos de 4 Subsistemas que contemplan el sistema de bombeo de alta presión tales como:

1. Subsistema de prefiltros
2. Subsistema de impulsión
3. Subsistema de motor eléctrico y acople
4. Subsistema de control y automatismo

Estos Subsistemas generan inestabilidades en la operación, con el fin de caracterizar y cuantificar el riesgo de cada suceso relevante asociado al sistema de bombeo de alta presión, se presenta 31 eventos de falla dividido en 4 subsistema.

"Cantidad de eventos por Subsistemas"



■ Prefiltros ■ Impulsión ■ Motor y acople ■ Control y Auto.

Figura 7. Distribución porcentual de la cantidad de eventos por subsistema que componen el sistema de bombeo de alta presión OI. **Fuente:** Elaboración propia.

¿Qué ocurrió?

Durante la operación del Sistema de Bombeo Alta Presión se registró un conjunto de anomalías operacionales caracterizadas por niveles elevados de ruido, incremento de temperatura, oscilaciones de presión del orden de ± 2 bar inestable, además de una disminución del caudal de permeado y un aumento del caudal de rechazo respecto a los valores normales de operación "75% de eficiencia en contexto ideal". Adicionalmente, se observaron daños en el sistema de prefiltros, asociados a la sobrecarga generada durante los eventos.



Figura 8. Presión salida bomba multietapa registrada en operación. **Fuente:** Confidencial.



Figura 9. Registro display caudal de rechazo OI. **Fuente:** Confidencial.



Figura 10. Registro display caudal de permeado OI. **Fuente:** Confidencial.

¿Cuándo ocurrió?

El evento fue detectado el 15 de junio de 2024 a las 16:30 horas, durante la inspección diaria realizada por el operador, instancia en la que se verifican dos veces al día las condiciones de funcionamiento del sistema en terreno.

¿Dónde ocurrió?

El evento se produjo en la Planta Modular de Tratamiento de Ósmosis Inversa, perteneciente al Sistema Productivo Agua Potable “El Cristo”, ubicada en Quillota. Dentro de la instalación, la falla se presentó específicamente en el Sistema de Bombeo de Alta Presión, correspondiente al Área 2, activo/sistema AP001.

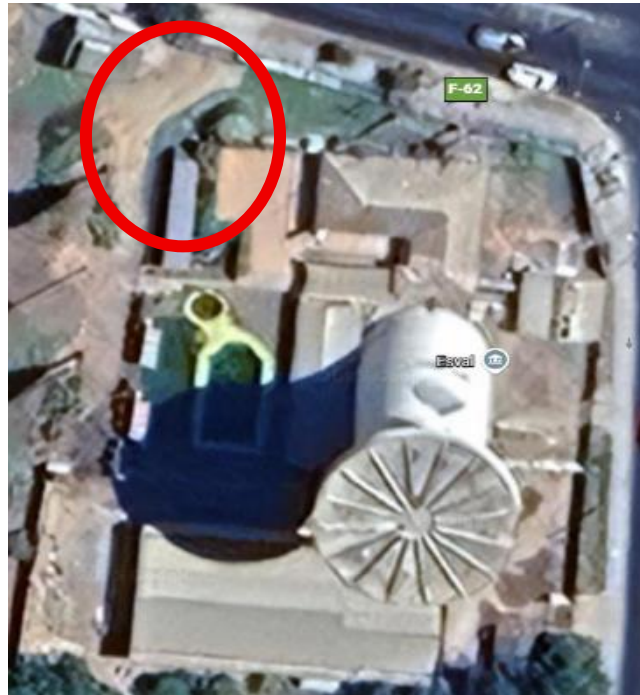


Figura 11. Ubicación de PTMOI, ubicada dentro del recinto “Sistema Productivo de Agua Potable El Cristo”. **Fuente:** Google Maps.



Figura 12. Ubicación de subsistemas, sensores y proceso/control de bombeo alta presión, área 2 de PTMOI. **Fuente:** Confidencial.

¿Cuál fue el impacto?

El evento generó consecuencias operacionales y económicas para el sistema de OI. Desde el punto de vista funcional, las anomalías detectadas (ruido elevado, incremento de temperatura, oscilación de presión ± 2 bar, disminución del caudal de permeado y aumento del caudal de rechazo) ocasionaron un funcionamiento inestable del sistema de bombeo y la aparición de daños en el sistema de prefiltros, afectando la continuidad normal de la operación.

3.5. Cuantificación del Impacto relacionado a los eventos

A continuación, se procede a cuantificar económicamente el impacto generado, con el objetivo de traducir las consecuencias del evento analizado en términos monetarios. Esta valoración permite dimensionar de manera objetiva los efectos de la falla sobre los costos operacionales, productivos y de mantenimiento, proporcionando un sustento técnico para la priorización de acciones correctivas y la toma de decisiones orientadas a la mejora del desempeño del sistema.

- Seguridad: Sin Accidentes, Riesgo potencial bajo
- Ambiente: baja, desecho indeseado de agua captada.

En términos económicos, el evento se cuantifica mediante los siguientes valores registrados:

- Costo Directo (CD): \$13.062.440
- Penalización (PEN): \$5.789.775
- Penalización Total (PT): CD + PEN: \$18.852.215

Para la estimación del impacto anual asociado a los eventos de los 4 subsistemas, se utiliza la frecuencia histórica registrada:

$$FF = \frac{31 \text{ eventos}}{10 \text{ años}} = 3.1 \frac{\text{eventos}}{\text{año}}$$

A partir de estos datos, se determina el impacto total mediante el Riesgo Total Anualizado (RTA), según la siguiente expresión:

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$RTA = 3.1 \times 18.852.215 = \$58.441.886 \text{ CLP}$$

Este valor representa el impacto económico anual asociado a la recurrencia del evento, y permite priorizar este modo de falla dentro del análisis causa raíz.

3.5.1. Jerarquización de los modos de falla físicos

El sistema evaluado presenta un total de 31 modos de falla identificados durante el análisis funcional y la revisión histórica de eventos. Sin embargo, al aplicar el enfoque de priorización recomendado por la literatura de confiabilidad particularmente el principio de Pareto (80/20) se observa que solo 10 modos de falla concentran aproximadamente el 80% del Riesgo Total Anualizado (RTA) del sistema.

Este comportamiento es habitual en equipos rotativos y sistemas hidráulicos, donde un número reducido de fallas domina el impacto operacional, económico y de disponibilidad. Tal como señala la literatura [10 y 11], *“la mayoría de los problemas significativos provienen de una minoría de modos de falla, por lo que el análisis debe enfocarse en aquellos que controlan el riesgo real del activo”*.

La distribución del riesgo obtenida en este estudio confirma este patrón: los 10 modos de falla priorizados son responsables de la mayor parte de los costos por materiales, mano de obra, tiempos fuera de servicio y pérdidas de producción, mientras que los 21 modos restantes contribuyen individualmente a un impacto marginal.

En línea con las buenas prácticas de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), RCA y la gestión moderna de activos, se priorizan los modos de falla de mayor severidad, mayor frecuencia o contribución al riesgo, optimizando el uso de recursos técnicos y garantizando que el estudio se centre en los eventos que realmente afectan la disponibilidad del sistema de bombeo.

Dado este comportamiento, la jerarquización de los modos de falla se centrará en aquellos eventos que presentan alta frecuencia y elevado riesgo económico, ya que son los principales contribuyentes al deterioro de la confiabilidad del sistema de bombeo de alta presión. Estos resultados orientan el desarrollo del RCA hacia las causas que generan mayor impacto, permitiendo priorizar acciones correctivas y preventivas que mejoren la continuidad operativa del proceso.

3.5.2. Aplicación jerárquica de los modos de falla físicos

Los modos de fallos dentro del RCA se definen como los eventos físicos que generan el paro imprevisto o la degradación de la función. Estos fallos amenazan directamente el cumplimiento de la norma chilena [1], para agua potable.

Utilizaremos el método del RTA para cuantificar y jerarquizar los modos de falla que tienen mayor impacto en la operación.

A continuación, se adjunta la Tabla N°2 donde se exponen los resultados del riesgo total anualizado para los modos de falla significativos:

Tabla 2. Concentración del 80% del riesgo anualizado por modo de falla. **Fuente:** Base de datos confidencial.

Modos de Falla	de FF (fallas/año)	TPPR (horas)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos Directos (\$/falla)	SHA (\$/falla)	RTA (\$/año)
Bobinado tierra dañado ^a	0,3	6	\$ 71.700	\$ 2.020.000	N/A	\$ 3.765.060
Bomba cavita	1	4	\$ 71.700	\$ 854.500	N/A	\$ 3.704.800
Cartuchos obstruidos	12	1	\$ 71.700	\$ 180.800	N/A	\$ 3.030.000
Aislamiento perforado dv/dt	0,1	12	\$ 71.700	\$ 2.400.000	N/A	\$ 2.966.040
Impulsor desgastado	0,5	4	\$ 71.700	\$ 854.500	N/A	\$ 1.852.400
Instrumentación del ΔP dañada	3,5	1	\$ 71.700	\$ 400.000	N/A	\$ 1.650.400
Tubería de sección fisurada	1	2	\$ 71.700	\$ 692.000	N/A	\$ 1.527.400
Rodamiento dañado	0,7	4	\$ 71.700	\$ 419.000	N/A	\$ 1.373.960
Housing corroído	0,2	5	\$ 71.700	\$ 1.250.000	N/A	\$ 1.321.700
Brida de descarga dañada	2	2	\$ 71.700	\$ 223.240	N/A	\$ 1.179.760

3.6. Consideración de los aspectos SHA en el análisis

En la presente evaluación de modos de falla, los aspectos asociados a Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (SHA) no fueron incorporados dentro del cálculo del RTA. Esto se debe a que, según la revisión de la operación del sistema y la evidencia histórica disponible,

ninguno de los 31 modos de falla identificados presenta consecuencias significativas en términos de afectación a personas, impacto ambiental o riesgos regulatorios.

Las fallas observadas se concentran principalmente en impactos operacionales y económicos, tales como pérdidas de presión, detenciones no programadas, costos correctivos y variabilidad en el rendimiento del proceso. En todos los casos, los modos de falla tienen consecuencias contenidas dentro del módulo de ósmosis inversa, sin comprometer la seguridad del personal ni generar vertimientos, derrames, emisiones o condiciones que puedan representar riesgo ambiental.

Por esta razón, y de acuerdo con las buenas prácticas recomendadas en análisis de confiabilidad, los factores SHE se consideran de impacto muy bajo y prácticamente nulo para este sistema en particular, por lo que no se incluyen en la priorización cuantitativa. No obstante, el sistema continúa operando bajo los estándares de la empresa sanitaria y cualquier futura modificación que introduzca nuevos riesgos SHE deberá ser reevaluada en actualizaciones posteriores del RCA.

3.7. Identificación del modo de falla primario que genera el problema sistemático

El análisis del RTA evidencia que, si bien el modo de falla *Bobinado a tierra dañada* presenta el valor más alto (\$3.765.060) debido al elevado costo directo de reparación, y la *Bomba cavitada* le sigue con \$3.704.800, ambos corresponden a fallas finales dentro de la cadena de deterioro del sistema. A través del análisis del árbol lógico se identificó que el modo de falla *Cartucho Obstruido*, con una frecuencia significativamente mayor (12 fallas/año) y un RTA de \$3.030.000, constituye el más interesante a ser considerado en un RCA.

La obstrucción progresiva del elemento filtrante incrementa las pérdidas de carga en succión, reduciendo el NPSHa disponible y generando cavitación intermitente, oscilaciones de presión y degradación del flujo de entrada hacia la bomba multietapa.

Estas condiciones se traducen en mayores temperaturas, esfuerzos hidráulicos y cargas dinámicas que aceleran el desgaste de impulsores, sellos, rodamientos y, en última instancia, inducen sobrecalentamiento y fallas dieléctricas en el motor. Este modo de falla es particularmente relevante porque, a diferencia de los demás, no cuenta con instrumentación que permita su detección temprana, y los síntomas iniciales como ruido hidráulico, pérdida transitoria de rendimiento o variación del caudal suelen manifestarse solo cuando ya existe deterioro en el tren de bombeo.

Por ello, aunque los mayores costos económicos se asocian a fallas finales como el bobinado, se selecciona *Cartucho Obstruido* como eje principal del análisis técnico, dado que su mitigación tiene el potencial de interrumpir la cadena causal, reducir de manera significativa el riesgo global y mejorar la productividad y confiabilidad del sistema de ósmosis inversa en operación sanitaria.

4. Estructura y formulación de hipótesis

Luego de haber definido los modos de falla, se procede con la definición y validación de las hipótesis, lo cual se logra respondiendo a la pregunta: ¿Por qué ocurren los modos de fallos?

Las hipótesis más probables deben validarse con hechos, las hipótesis inconsistentes deberán descartarse.

Se utilizó la bitácora o libro de novedades del operador, ya que es el, quien está presente de manera física en el área y quien más conoce el sistema y equipos.

EVENTO N° 1: 15 de junio 2024, en el diferenciador de presión se identifica comportamientos anómalos.

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárate, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 103
-------------------------------	--	----------

- Operador identifica taponamiento de válvula aliviadora de porta filtros.

EVENTO N° 2: 03 de julio 2024, temperatura elevada en área 2 de PMTOI.

- Se revisa de manera física que componente esta con temperatura elevada identificando piping salida porta filtros.

Evento N°3: 16 de julio 2024, Cambio de filtros de polipropileno por programa preventivo.

- Operadores detectan degradación de los filtros mayor a cambios anteriores, con presencia de pequeñas depredaciones.

EVENTO N°4: 5 de agosto 2024, sistema de automatismo se desconfiguro.

- Operadores detectan arranque y detección seguida de sistema de bombeo de alta presión.

4.1. Definición de Hipótesis

1. Modo de Falla: Cartuchos Obstruidos

Hipótesis

- 1.1 Material filtrante degradado → Probabilidad Alta
- 1.2 Colapso mecánico del cartucho → Probabilidad Alta

Tabla 3. Hipótesis del modo de falla físico. **Fuente.** Elaboración Propia.

#	Modo de Fallas	#	Hipótesis	Probabilidad Tipo A –Alta Tipo B –Media Tipo C –Baja
1	Cartucho Obstruido	1.1	Material filtrante degradado	TIPO A
		1.2	Colapso mecánico del cartucho	TIPO A

4.2. Definición y validación de causas raíces físicas (CRF), humanas (CRH) y latentes (CRL)

Seguidamente se responderá a la pregunta: ¿Por qué ocurrieron las hipótesis planteadas? con el propósito de establecer los tres posibles niveles de causas raíz (físicas, humanas o latentes) antes mencionadas:

1. Modo de Falla: Cartucho Obstruido

1.1. Hipótesis: Material filtrante degradado (CRF)

Se aísla y drena el alojamiento del filtro para una inspección visual y física del elemento. La hipótesis se confirma al observar que el cartucho está, degradado, saturado y existe presencia de arenilla en el fondo de porta filtros, indicando una falla por excesiva presión y partículas desprendidas.

Responsable de Validar → **Operador Senior Producción**



Figura 13. Inspección del operador en cambio de cartuchos por funcionamiento de 336 hrs (14 días). **Fuente:** Confidencial.



Figura 14. Confirmación de saturación prematura de cartuchos. **Fuente:** Confidencial.

1.1.1. Selección incorrecta del micraje del cartucho (CRH)

Responsable de Validar → **Operador Senior Producción/Técnico de Calidad y Jefe Unidad Producción.**



Figura 15. Sistema SDI para selección de micraje de los cartuchos. **Fuente:** Confidencial.

Respuesta: La selección incorrecta del micraje se generó por una decisión administrativa sin validación técnica. Al externalizar la licitación y el almacenamiento, el proveedor aplicó solo los criterios mínimos del fabricante, omitiendo los requisitos internos y el SDI requerido para la operación de ósmosis inversa.

1.1.2. Instalación incorrecta del cartucho (CRH)

Responsable de Validar → **Mantenedor Senior PMTOI**



Figura 16. Diferencial de presión incorrecta por no purga de aire de porta cartuchos generados por mala instalación. **Fuente:** Confidencial.



Figura 17. Sistema de purga de aire cerrada por no verificación. **Fuente:** Confidencial.

1.1.3. Cartuchos almacenados en mala condición (CRH)

Responsable de Validar → Jefe de Unidad Producción.

Respuesta: *Al licitar y encargar el almacenamiento a un tercero, este proveedor solo aplicó los estándares mínimos y parciales del fabricante, sin considerar los requisitos internos de la corporación y calidad (SDI). Esto resultó en la adquisición y distribución de cartuchos incompatibles o de calidad variable, ya que la selección se basó en la licitación en lugar de en especificaciones corporativas rigurosas*

1.1.4. Falta de estándar corporativo de selección del cartucho (CRL)

Responsable de Validar → **Jefe de Unidad Producción**

Respuesta: *Confirmación de no existencia de documentación al respecto, luego de cambio de jefatura reciente.*

1.1.5. Personal con falta de capacitación técnica para instalar el cartucho (CRL)

Responsable de Validar → **Jefe de Unidad Producción**

Respuesta: *Técnicos sin capacitación vigente de mantenimiento sistemático de cambio de cartuchos del sistema.*

Resultado: **APROBADA**

1.2. Hipótesis: Colapso mecánico del cartucho/CRF

Se aísla y drena el alojamiento del filtro para una inspección visual y física del elemento. La hipótesis se rechaza al observar que el cartucho no está aplastado, deformado o colapsado estructuralmente, indicando una falla por excesiva presión

Responsable de Validar → **Operador Senior Producción**

Respuesta: *Inspección de cartuchos a las 336 hrs de funcionamiento no se detectan colapso mecánico del mismo, no se puede aceptar esta hipótesis.*

Resultado: **RECHAZADA.**

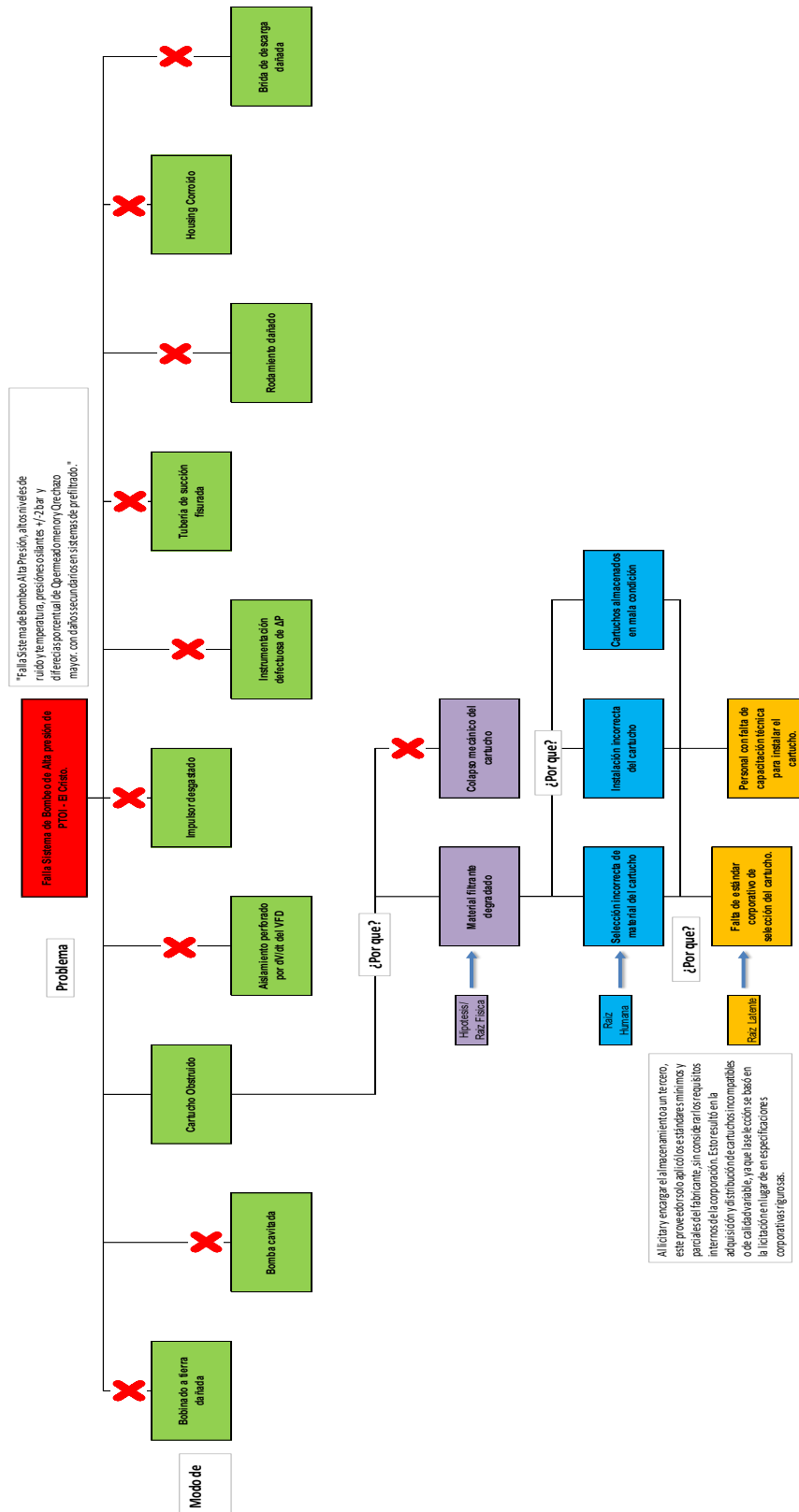


Figura 18. Árbol lógico de falla. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Definición soluciones propuestas

Posterior a la identificación de causas raíz para el caso de estudio, se procede a plantear y proponer soluciones para cada causa raíz establecida y sus hipótesis, con el propósito de prevenir la recurrencia de las fallas, minimizando y/o controlando sus efectos para el cumplimiento de los objetivos de la organización, entre estas, se postula las siguientes:

Además, las estimaciones de costos presentadas en este análisis corresponden a una simulación referencial, desarrollada con el fin de entregar una aproximación económica coherente con las acciones propuestas en el RCA. Para su elaboración se utilizaron rangos de precios observados en el mercado nacional, considerando tarifas típicas de mano de obra industrial, costos de materiales y valores de cartuchos y servicios disponibles en proveedores chilenos. Estos montos no representan cotizaciones formales, pero permiten dimensionar de manera razonable el orden de magnitud del impacto económico asociado a cada causa latente y a las medidas correctivas sugeridas.

Hipótesis

1.1. Material filtrante degradado (CRF)

1.1.2 Instalación incorrecta del cartucho (CRH)

1.1.3 Cartuchos almacenados en mala condición (CRH)

Recomendaciones:

Implementar un procedimiento estandarizado de instalación (POE)

- Incluir torque de tapas, verificación de O-rings, lubricación compatible, orientación del cartucho y aseguramiento del asiento.
- Incorporar fotografías, pasos numerados y criterios de rechazo.

Responsable → **Jefe de Unidad Producción**

Uso obligatorio de checklist de instalación

- Confirmar: integridad del cartucho, condición de O-rings, lubricante aprobado, presión de prueba posterior.
- Evita omisiones en tareas rutinarias.

Responsable → Mantenedor Senior PMTOI

Señalización clara en la carcasa del filtro

- Etiquetas con sentido del flujo, torque recomendado y advertencias.
- Reduce errores por confusión o prisa.

Responsable → **Jefe de Unidad Producción**

Recursos Aproximados: \$600.000

1.1.4. Falta de estándar corporativo de selección del cartucho (CRL)

Recomendaciones:

Para evitar que vuelvan a ocurrir las **CRH 1.1, 1.1.2 y 1.1.3**

Definir un estándar corporativo de filtración primaria

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárate, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 109
-------------------------------	--	----------

- Especificar micraje mínimo 5 μm según SDI.
- Material: polipropileno soplado por fusión (melt-blown) o plisado.
- Límite máximo de ΔP permitido antes de recambio.

Responsable → **Jefe de Unidad Producción/Gerencia de Producción**

Criterios operacionales basados en condición (ΔP y horas)

- Cambio no solo por calendario, sino por:
 - $\Delta P > 1$ bar
 - Acumulación visible
 - Horas máximas según calidad del agua de pozo

Responsable → **Mantenedor Senior PMTOI/Operador Senior Producción**

Registro corporativo de desempeño por lote

- Identificar cartuchos con menor duración o mayor ΔP .
- Permite trazabilidad para auditorías y reclamos al proveedor.

Responsable → **Operador Senior Producción**

Recursos Aproximados: \$300.000

1.1.5 Personal con falta de capacitación técnica para instalar el cartucho (L)

Recomendaciones:

Para evitar que vuelvan a ocurrir las **CRH 1.1, 1.1.2 y 1.1.3**

Supervisión activa en turnos críticos

- Instalaciones realizadas por personal nuevo deben ser verificadas por personal senior.

Responsable → **Jefe de Unidad Producción**

Simulaciones de instalación fuera de servicio

- Reducen errores en campo.
- Aumentan confianza del operador antes de manipular equipo real.

Responsable → **Mantenedor Senior PMTOI**

Recursos Aproximados: \$400.000

Recursos Totales: \$1.200.000

4.4. Evaluación de la efectividad de las soluciones

Las soluciones propuestas implican inversiones, por ello, se evaluará en la siguiente tabla la efectividad de esta y verificar si la estrategia es mejor a la de la situación actual en relación con sus riesgos totales anualizados y confiabilidad que puedan ofrecer al equipo.

FF: Frecuencia de eventos por año fallas/año (promedio)

TPPR: horas (promedio)

2026 Volumen 1 Número 1	Benjamín Zárate, Joaquín Fernández, Maximiliano Salazar, Jonatan Cortés, Carlos Parra	PÁG. 110
-------------------------------	--	----------

IP: Imp. Prod. \$/hora (promedio)

CD: Costos directos por falla \$/falla (promedio)

SHA: \$/falla (promedio)

RTA: Riesgo \$/año (promedio)

N: Número de años de la recomendación

CR: Costos de la recomendación anualizada

BEN: Beneficios esperados del cambio por año \$/año

$$BEN = RTA(actual) - RTA(recomendación) - CR \quad (10)$$

Tabla 4. Beneficio esperado luego de implementar las soluciones. **Fuente:** Base de datos confidencial.

Modos de Falla	FF (fallas/año)	TPPR (horas)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos Directos (\$/falla)	SHA (\$/falla)	RTA (actual) (\$/año)		
Cartuchos obstruidos	12	1	\$ 71.700	\$ 180.800	N/A	\$3.030.000		
RTA Situación futura								
Frecuencia de eventos (falla/año)	TPPR (horas) (Prom.)	Imp. Prod. \$/falla (Prom.)	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/FALLA (Prom.)	Riesgo \$/año (recomendación)	Número de años de la recomendación	Costos de la recomendación anualizada (CR)	Beneficio esperado (\$/año)
2	0,5	\$71.700	\$180.800	-	\$252.500	2	\$600.000	\$2.177.500

Si se comparan ambas situaciones la condición actual del sistema y el escenario posterior a la implementación de las recomendaciones se observa una diferencia sustancial en el riesgo económico asociado a los modos de falla. En la situación actual, RTA asciende a \$3.030.000 CLP, reflejando el impacto combinado de altas frecuencias de falla, eventos en cascada y costos directos elevados. Por el contrario, al aplicar las acciones correctivas propuestas, el RTA proyectado se reduce \$252.500 CLP, generando un ahorro potencial de \$2.177.500 CLP, lo que evidencia una disminución drástica del riesgo y un incremento significativo en la confiabilidad operacional del sistema.

La magnitud de esta reducción confirma que las medidas recomendadas son altamente efectivas, ya que no solo disminuyen los costos asociados a reparaciones y detenciones no programadas, sino que además mitigan el impacto sobre la producción y extienden la vida útil del conjunto de bombeo y del sistema de ósmosis inversa. Esta mejora se logra mediante la correcta implementación de actividades de mantenimiento, estandarización de procedimientos, inspecciones periódicas, capacitación técnica del personal y reemplazo de componentes en los intervalos apropiados, lo cual reduce de manera directa la frecuencia de fallas y aumenta la disponibilidad del sistema.

El proceso RCA debe evaluarse continuamente mediante indicadores de Disponibilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad y desempeño económico, verificando que la metodología está cumpliendo su propósito de disminuir el riesgo operacional. Si bien los resultados iniciales respaldan plenamente la efectividad de las soluciones propuestas, es necesario establecer un plan de seguimiento anual, que permita medir el grado de cumplimiento de los beneficios proyectados, auditar la ejecución de las recomendaciones y ajustar el plan de acción cuando sea

necesario. Solo mediante este seguimiento sistemático se garantizará que las mejoras implementadas mantengan su impacto en el tiempo y continúen aportando valor al proceso productivo.

5. Resultados de RCA de los eventos del sistema de bombeo de alta presión en PMTOI

Entre los resultados obtenidos mediante la implementación de la metodología de RCA, destaca la conformación de un equipo multidisciplinario capaz de identificar, analizar y comprender de manera integral los eventos que conducen al fallo en el sistema de bombeo de alta presión de la planta modular de ósmosis inversa. Este trabajo colaborativo permitió integrar distintos criterios técnicos, operacionales y de mantenimiento, orientados a un propósito común: mitigar y controlar los riesgos que afectan la producción, la disponibilidad del sistema y los costos totales asociados a las fallas.

El análisis permitió identificar los modos de falla más relevantes del sistema, determinándose un RTA de \$58.441.866 CLP en la condición actual, impulsado principalmente por fallas de alto costo y efectos en cascada, como la cavitación y el daño dieléctrico del bobinado del motor. A través del modelo lógico y la validación técnica del equipo, se estableció que el modo de falla Cartucho Obstruido constituye la causa raíz operacional dominante, ya que afecta directamente las condiciones hidráulicas de succión y desencadena fallas subsecuentes en la bomba multietapa y el motor eléctrico.

Sobre esta base, se formularon las hipótesis de falla para cada modo identificado, determinándose causas raíz tanto de origen físico, como degradación del material filtrante, y humano, como desviaciones en la instalación y ausencia de estándares de selección. Para cada causa raíz se propusieron recomendaciones técnicas orientadas a disminuir la frecuencia de ocurrencia, mejorar la calidad hidráulica del sistema y reforzar los procedimientos de mantenimiento, incluyendo estandarización documental, capacitación operativa, criterios de cambio basados en condición y mejoras en la inspección.

La implementación de estas medidas demuestra una reducción sustancial del riesgo, proyectando un nuevo RTA de \$2.177.500 CLP, lo que representa un ahorro anual estimado de \$56.264.366 CLP. Este resultado evidencia que destinar recursos a la ejecución de las acciones correctivas planteadas no solo mejora la confiabilidad del sistema de bombeo, sino que también contribuye de manera directa a disminuir tiempos de mantenibilidad, evitar fallas en cascada y asegurar la continuidad operacional del proceso de ósmosis inversa.

Finalmente, se recomienda establecer un plan de seguimiento anual, que permita verificar el impacto real de las acciones implementadas, actualizar los análisis según nuevas condiciones operacionales y garantizar la sostenibilidad de los beneficios obtenidos. Con ello, la metodología ACR se consolida como una herramienta efectiva para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de activos dentro de la industria sanitaria.

6. Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los resultados del RCA aplicado al sistema de bombeo de alta presión de la planta modular de ósmosis inversa, y considerando la reducción obtenida en el RTA de \$58.441.866 CLP en la condición actual a \$2.177.500 CLP tras la implementación de las recomendaciones se proponen las siguientes acciones para asegurar la sostenibilidad técnica y económica del sistema:

- a) Incorporar el RCA como metodología formal dentro de la gestión del mantenimiento.
- b) Se recomienda que los jefes de mantenimiento integren la metodología RCA como una práctica habitual dentro del MGM. Su aplicación disciplinada permite reducir recurrentemente los riesgos operacionales, optimizar costos y eliminar causas raíz que afectan la confiabilidad del sistema. Esta recomendación está alineada con la Fase 3 del

- MGM descrita por Parra & Crespo.
- c) Capacitación continua al personal operativo y de mantenimiento. El análisis demostró que varias causas raíz son de tipo humano o latente (instalación incorrecta, falta de estándar, ausencia de criterios técnicos). Por ello, se recomienda implementar:
Programas formales de capacitación en instalación, inspección y selección de cartuchos.
Simulaciones fuera de servicio para entrenamiento práctico.
Supervisión activa en tareas críticas.
 - d) Implementar estándares corporativos para la selección y operación de filtros. Este estándar evitará variabilidad en el rendimiento y reducirá fallas por fouling y restricciones hidráulicas, que fueron identificadas como la causa raíz operacional dominante del sistema. El estándar corporativo debe incluir:
Micraje mínimo del cartucho (5 μm según SDI del pozo).
Especificación de material (melt-blown o plisado).
Límites de ΔP para cambio por condición (<1 bar).
Reglas de almacenamiento y control de calidad de lotes.
 - e) Registrar digitalmente todos los modos de falla y sus frecuencias. El análisis identifica 31 modos de falla, pero solo 10 concentran el 80% del RTA total (criterio de Pareto). Por ello, se recomienda:
Registrar en formato digital cada evento de falla.
Generar series históricas para análisis de tendencia.
Utilizar estos registros para actualizar el RCA de manera anual.
 - f) Aplicar inspecciones basadas en condición para el prefiltro. Dado que Cartucho Obstruido es la causa raíz que origina la cadena de fallas (cavitación, variaciones de presión, sobrecalentamiento del motor), se recomienda establecer:
Control sistemático del diferencial de presión (PI-01/PI-02).
Cambio por condición cuando $\Delta P > 1$ bar.
Verificación semanal del estado del alojamiento.
 - g) Implementar seguimiento anual de la efectividad del RCA. Siguiendo el modelo de Parra & Crespo, se debe evaluar anualmente (antes y después de las aplicaciones de RCA):
Confiabilidad (TPO)
Disponibilidad (A)
Mantenibilidad (TPFS)
Riesgos económicos (RTA)
 - h) Auditar la ejecución y cumplimiento de los nuevos estándares. Se sugiere:
Auditorías internas semestrales.
Validación de procedimientos (POE, checklist).
Revisión de inventarios, almacenamiento y compras.

6.1 Oportunidades de Mejora

En la operación de plantas de OI utilizadas por empresas sanitarias, la continuidad y estabilidad del proceso dependen estrechamente del desempeño del sistema de bombeo de alta presión y de la interacción entre la calidad del agua de alimentación, el pretratamiento y las condiciones hidráulicas del sistema. Debido a que las fallas en estos componentes pueden derivar en detenciones no programadas, pérdida de producción y aumento de los costos operacionales, resulta imprescindible identificar oportunidades de mejora que permitan fortalecer la confiabilidad del sistema. Esta necesidad se encuentra en línea con lo planteado [10, 11], quienes destacan que gran parte de los eventos de falla en procesos industriales con equipos rotativos está asociada a deficiencias en el control operativo, desgaste de componentes críticos y ausencia de mecanismos sistemáticos de análisis de fallas.

En el contexto específico de las plantas modulares de tratamiento por ósmosis inversa, el agua captada desde pozos profundos presenta variabilidad en sólidos suspendidos, arenas finas y gases disueltos, lo que aumenta la probabilidad de ensuciamiento del prefiltro, esfuerzos adicionales sobre la bomba multietapa y degradación prematura del rendimiento de las membranas. Asimismo, la limitada instrumentación disponible (principalmente basada en inspección manual) incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a fallas hidráulicas como

cavitación, aireación, golpes de ariete y oscilaciones de presión, que pueden afectar tanto la integridad del sistema de bombeo como la estabilidad del proceso de separación por membranas.

Dado que la mayoría de estas fallas poseen un impacto operativo y económico considerable, la intervención no debe limitarse únicamente a la corrección inmediata del evento. Al contrario, se requiere incorporar medidas preventivas y predictivas que disminuyan la probabilidad de recurrencia, tal como plantea en la literatura [12 y 13], al señalar que la función del mantenimiento debe orientarse a asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, minimizando las detenciones no programadas y sus efectos sobre el proceso productivo.

Por lo anterior, se identifica una clara oportunidad de mejora orientada a optimizar la confiabilidad y disponibilidad del sistema de bombeo de alta presión, reduciendo las vulnerabilidades asociadas a desviaciones hidráulicas, desgaste mecánico y deficiencias operacionales. Este análisis permitirá no sólo mitigar las fallas actuales, sino también establecer controles y procedimientos que contribuyan a la mejora continua del proceso, alineándose con los principios de gestión de activos y con las buenas prácticas mencionadas en la literatura técnica reciente.

7. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Normalización. *Normas NCh 409: Calidad y Muestreo del Agua Potable — EEO-1*, Chile, 2005. Disponible en: <https://is.gd/XNpqcW.com> (accedido: dic. 2025).
- [2] C. Parra y A. Crespo. *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. Desarrollo y aplicación práctica de un Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM)*. Editado por INGEMAN, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Sevilla, Segunda Edición, 2015. España. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29363.66083>
- [3] J. J. Latino. *Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom-Line Results*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.
- [4] J. Dean. *Root Cause Analysis: A Practical Framework*. Milwaukee, WI, USA: Quality Press, 1999.
- [5] J. Azpilcueta and C. Parra. *Análisis Causa Raíz de Fallas (RCFA – Root Cause Failure Analysis). Caso de estudio: Sector Construcción*. INGEMAN, España, Marzo, 2017. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21098.95688>
- [6] Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., Gómez Fernández, J., Parra Márquez, C., and López Campos, M. The maintenance management framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. **2009**, 15(2):167-178. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510910961110>
- [7] M. Mulder. *Basic Principles of Membrane Technology*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1996.
- [8] R. W. Baker. *Membrane Technology and Applications*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [9] A. Schäfer. *Nanofiltration: Principles, Applications, and New Materials*. Oxford, UK: Elsevier, 2005.
- [10] C. Carvallo, J. Ciudad, C. Baldi y R. Gutiérrez. Análisis de fallas en sistemas industriales con equipos rotativos. *Revista Ingeniería y Gestión*, **2022**, vol. 18, no. 2, pp. 45–58.
- [11] R. Saavedra. Estrategias de mantenimiento para asegurar disponibilidad operacional en industrias de procesos. *Revista Latinoamericana de Mantenimiento*, **2014**, 2(3): 22–31.

[12] J. Moubray. *Reliability-Centered Maintenance*. 2nd ed. New York, NY, USA: Industrial Press, 1997.

[13] Parra, C.; Morán, C.; Pizarro, F.; Duque, P.; Aránguiz, A.; González-Prida, V.; Parra, J. Implementation of the Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey in Recycled Beverage Container Manufacturing Lines. *Information*. **2024**, 15(12), 784. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15120784>

Declaración ética

Conflicto de Interés: Nada que declarar. **Financiamiento:** Nada que declarar. **Revisión por Pares:** Doble ciego.



Todo el contenido de la RIMCEO — Revista de Activos de Ingeniería en Mantenimiento, Confiabilidad y Excelencia Operacional, está licenciada bajo Creative Commons, a menos que se especifique lo contrario o se trate de contenido recuperado de otras fuentes bibliográficas.