



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Planificación del mantenimiento de una planta desaladora

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autor: Javier Aparicio González
Director: Gregorio Munuera Saura

Cartagena, enero de 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia, en especial a mis padres, a mi hermano y a mis padrinos, por ser el pilar fundamental de mi vida y por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de todos mis estudios.

A Gregorio, mi director, por su paciencia, motivación y confianza, porque sin su guía este trabajo no habría sido posible.

RESUMEN

Conocer el funcionamiento de cualquier instalación es indispensable para planificar el mantenimiento de la misma. Con tal fin, se describirá el proceso de funcionamiento de una planta de desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa, así como los distintos elementos funcionales presentes en la instalación.

La gestión del mantenimiento tiene como principal objetivo buscar la mayor disponibilidad de la instalación, teniendo en cuenta a su vez otros aspectos importantes como la seguridad o el impacto ambiental. Para optimizar los recursos que se destinan a mantener operativas las instalaciones se establecen una serie de procedimientos y técnicas. La forma más eficaz y eficiente de distribuir los recursos es aplicándolos sobre los equipos críticos. Para ello, se llevará a cabo un análisis de criticidad y se establecerá una clasificación de los equipos en función de su criticidad. A partir de dicho análisis se definirán las diferentes técnicas de mantenimiento y se establecerán las técnicas predictivas, preventivas o correctivas a llevar a cabo sobre cada uno de los equipos críticos.

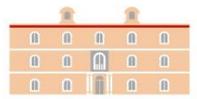
Por último, se describen una serie de herramientas que se utilizan para analizar la gestión del mantenimiento desarrollado, con el objetivo de mejorar la disponibilidad de la instalación y reducir los costes de mantenimiento. Además, se presentan ejemplos de aplicación de cada una de las herramientas descritas.

ABSTRACT

Knowing the operation of any installation is essential to plan the maintenance of it. For this purpose, the operation process of a seawater desalination plant by means of reverse osmosis, as well as the different functional elements present in the installation, will be described.

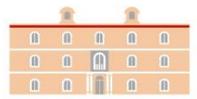
The main objective of maintenance management is to seek the greatest availability of the installation, taking into account other important aspects such as safety or environmental impact. To optimize the resources that are destined to keep the facilities operational, a series of procedures and techniques are established. The most effective and efficient way to distribute resources is by applying them to critical equipment. To do this, a criticality analysis will be carried out to establish a classification of the equipment according to their criticality. Based on this analysis, the different maintenance techniques will be defined and the predictive, preventive or corrective techniques to be carried out on each of the critical equipment will be established.

Finally, a series of tools that are used to analyse the maintenance management developed will be described, with the aim of improving the availability of the installation and reducing maintenance costs. In addition, examples of application of each of the tools described are presented.

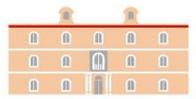


ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
Capítulo 1	11
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivos	11
1.3. Estructura y planteamiento	11
Capítulo 2	13
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y DE LA INSTALACIÓN	13
2.1. Introducción	13
2.2. Toma de agua de mar	14
2.2.1. Torre de toma	15
2.2.2. Inmisario submarino	16
2.2.3. Cántara de captación	17
2.2.4. Pozo de bombeo	17
2.3. Pretratamiento	17
2.3.1. Desinfección	18
2.3.2. Acidificación	18
2.3.3. Coagulación	19
2.3.4. Filtración de arena y antracita	19
2.3.5. Decloración	20
2.3.6. Antiincrustante	21
2.3.7. Filtración de cartuchos	21
2.4. Ósmosis inversa	22
2.4.1. Bombeo de alta presión	22
2.4.2. Bastidores de ósmosis inversa	23
2.5. Post-tratamiento	23
2.5.1. Adición de dióxido de carbono	23
2.5.2. Adición de carbonato cálcico	24
2.5.3. Almacenamiento de agua potable	25
2.5.4. Tratamiento de aguas rechazadas y de limpieza	26
2.5.5. Emisario submarino	27
2.6. Instrumentación	28



2.6.1.	Transmisor e indicador de presión	28
2.6.2.	Transmisor e indicador de presión diferencial	29
2.6.3.	Transmisor de nivel	29
2.6.4.	Sensor de nivel	30
2.6.5.	Transmisor e indicador de caudal	30
2.6.6.	Transmisor e indicador de temperatura	31
2.6.7.	Transmisor e indicador de conductividad	31
2.6.8.	Transmisor e indicador de pH	31
2.6.9.	Medidor de potencial redox	32
Capítulo 3		33
3. RELACIÓN DE EQUIPOS DE LA INSTALACIÓN		33
3.1.	Introducción	33
3.2.	Depósitos	33
3.3.	Bombas	33
3.4.	Agitadores	34
3.5.	Otros equipos	34
Capítulo 4		35
4. ANÁLISIS DE CRITICIDAD		35
4.1.	Introducción	35
4.2.	Criterios para la criticidad	35
4.3.	Análisis de criticidad	36
4.4.	Clasificación de equipos por criticidad	38
4.5.	Técnicas de mantenimiento	40
Capítulo 5		43
5. PLAN DE MANTENIMIENTO		43
5.1.	Introducción	43
5.2.	Mantenimiento predictivo	43
5.2.1.	Análisis de aceites	44
5.2.2.	Análisis de vibraciones	47
5.2.3.	Análisis de parámetros funcionales	52
5.2.4.	Inspección con ultrasonidos	52
5.2.5.	Inspección con líquidos penetrantes	56
5.2.6.	Inspección visual	58
5.2.7.	Pinza amperimétrica	59
5.2.8.	Polímetro	60



5.2.9.	Termografía infrarroja	60
5.2.10.	Relación de equipos y técnicas predictivas	66
5.3.	Mantenimiento preventivo	69
5.3.1.	Gamas de mantenimiento preventivo	69
5.4.	Mantenimiento correctivo	91
5.4.1.	Organización del personal de mantenimiento	91
5.4.2.	Repuestos	94
5.4.3.	Partes de incidencias	95
5.4.4.	Causas de fallos	96
5.4.5.	Análisis de fallos	98
5.4.6.	Gestión de mantenimiento asistido por ordenador	99
Capítulo 6		102
6. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		102
6.1.	Introducción	102
6.2.	Diagrama de Pareto	102
6.3.	Análisis causa raíz	105
6.4.	Mapa causal	119
6.4.1.	Ejemplo de aplicación de un mapa causal	121
Capítulo 7		124
7. CONCLUSIONES		124
BIBLIOGRAFÍA		125



Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de ósmosis.	13
Figura 2. Diagrama de ósmosis inversa.	14
Figura 3. Captación de agua de mar mediante una torre de toma.	15
Figura 4. Torre de toma.	16
Figura 5. Inmisario submarino.	16
Figura 6. Filtros de arena-antracita.	20
Figura 7. Filtros de cartucho.	22
Figura 8. Disolvedores de CO ₂ a baja presión.	24
Figura 9. Lechos de calcita.	25
Figura 10. Depósitos de agua potable.	26
Figura 11. Decantador de agua residual.	26
Figura 12. Emisario submarino.	27
Figura 13. Difusor del emisario submarino.	28
Figura 14. Transmisor e indicador de presión.	29
Figura 15. Caudalímetro electromagnético.	31
Figura 16. Analizador de aceite.	47
Figura 17. Espectro de frecuencias cuando existe un desequilibrio.	48
Figura 18. Desalineación paralela.	48
Figura 19. Desalineación angular.	49
Figura 20. Espectro de frecuencias cuando existe desalineación.	49
Figura 21. Holgura mecánica.	50
Figura 22. Espectro de frecuencias cuando existe un eje doblado.	50
Figura 23. Medición de Spike Energy.	51
Figura 24. Detección de fugas mediante ultrasonidos.	53
Figura 25. Medición de fenómenos eléctricos mediante ultrasonidos.	54
Figura 26. Inspección de rodamientos mediante ultrasonidos.	55
Figura 27. Medidor de espesores.	55
Figura 28. Funcionamiento de un medidor de espesores.	56
Figura 29. Aplicación de líquidos penetrantes.	57
Figura 30. Fundamento del ensayo por líquidos penetrantes.	58
Figura 31. Fuga de agua detectable a simple vista.	59
Figura 32. Pinza amperimétrica.	60
Figura 33. Polímetro.	60

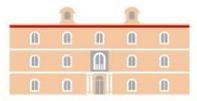


Figura 34. Cámara termográfica.	61
Figura 35. Imagen real de una conexión a temperatura excesiva.	62
Figura 36. Imagen termográfica de una conexión a temperatura excesiva.	62
Figura 37. Imagen real de un cuadro eléctrico con una conexión a temperatura excesiva.	63
Figura 38. Imagen termográfica de un cuadro eléctrico con una conexión a temperatura excesiva.	63
Figura 39. Imagen real de un motor eléctrico con rodamientos sobrecalentados.	64
Figura 40. Imagen termográfica de un motor eléctrico con rodamientos sobrecalentados.	64
Figura 41. Imagen real de un aislamiento refractario en mal estado.	65
Figura 42. Imagen termográfica de un aislamiento refractario en mal estado.	65
Figura 43. Imagen termográfica de una tubería con sedimentación.	66
Figura 44. Imagen termográfica del nivel de líquido de un depósito.	66
Figura 45. Organigrama del personal de mantenimiento.	92
Figura 46. Parte de incidencias.	96
Figura 47. Estructura modular de SAP R/3.	101
Figura 48. Diagrama de Pareto inicial.	104
Figura 49. Diagrama de Pareto final.	105
Figura 50. Analogía del análisis causa raíz.	106
Figura 51. Árbol de fallo - Fallo de la bomba.	108
Figura 52. Árbol de fallo - La bomba no desarrolla ninguna presión y no genera flujo.	109
Figura 53. Árbol de fallo - La bomba genera alguna presión pero no bombea líquido.	110
Figura 54. Árbol de fallo - La bomba genera menos flujo del esperado.	111
Figura 55. Árbol de fallo - El motor requiere una potencia excesiva.	112
Figura 56. Árbol de fallo - No funciona bien, pero no se aprecia ningún síntoma extraño.	113
Figura 57. Árbol de fallo - Funciona bien al principio, pero después para de bombear.	114
Figura 58. Árbol de fallo - La bomba hace ruido o vibra excesivamente.	115
Figura 59. Árbol de fallo - La bomba hace ruido o vibra excesivamente (2).	116
Figura 60. Árbol de fallo - Los rodamientos se estropean de forma temprana.	117
Figura 61. Árbol de fallo - El sello mecánico tiene fugas excesivas.	118
Figura 62. Estructura básica de un mapa causal.	120
Figura 63. Estructura de un mapa causal con varias causas para un mismo efecto.	120
Figura 64. Diagrama de Ishikawa.	121
Figura 65. Mapa causal con enfoque de 5 por qué.	121
Figura 66. Mapa causal de la parada en la desaladora de Águilas	123



Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de depósitos.	33
Tabla 2. Relación de bombas.	34
Tabla 3. Relación de agitadores.	34
Tabla 4. Relación de otros equipos.	34
Tabla 5. Criterios para la criticidad.	35
Tabla 6. Grados de criticidad.	36
Tabla 7. Análisis de criticidad.	38
Tabla 8. Clasificación de equipos por criticidad.	40
Tabla 9. Niveles de criticidad.	40
Tabla 10. Relación de equipos y mantenimiento correspondiente.	42
Tabla 11. Relación de equipos con sus correspondientes técnicas predictivas.	68
Tabla 12. Periodicidad de las tareas de mantenimiento.	70
Tabla 13. Cualificación del personal que realizará las tareas de mantenimiento.	70
Tabla 14. Gamas de mantenimiento preventivo.	80
Tabla 15. Gama diaria de mantenimiento preventivo.	84
Tabla 16. Gama semanal de mantenimiento preventivo.	85
Tabla 17. Gama mensual de mantenimiento preventivo.	86
Tabla 18. Gama trimestral de mantenimiento preventivo.	88
Tabla 19. Gama anual de mantenimiento preventivo.	90
Tabla 20. Gama bianual de mantenimiento preventivo.	91
Tabla 21. Frecuencia de las causas de fallo de un turbocompresor.	103
Tabla 22. Indisponibilidad provocada por las causas de fallo de un turbocompresor.	103
Tabla 23. Indisponibilidad provocada por las causas de fallo de un turbocompresor (2).	104
Tabla 24. Definición del problema.	122



Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El mantenimiento industrial es uno de los pilares fundamentales dentro de la industria. Se trata de un indicador de la cantidad y calidad de la producción de una empresa, lo que implica que cuanto más eficiente sea el mantenimiento de la misma, menor será su indisponibilidad. En otras palabras, el mantenimiento puede considerarse como una inversión que ayudará a mejorar la calidad en la producción.

Debido a la importancia que ha adquirido el mantenimiento en la actualidad, se pretende elaborar un plan de mantenimiento para una instalación industrial. La instalación escogida es una planta de desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa, con una capacidad de producción aproximada de 40000 m³/día.

El mantenimiento de cualquier proceso productivo está fuertemente condicionado por el presupuesto disponible para tal fin. En el presente trabajo no se realiza ningún tipo de valoración económica sobre los costes de mantenimiento, ya que la planificación del mismo variaría en función del presupuesto a disposición. Sin embargo, uno de los objetivos que se pretende alcanzar con este trabajo es identificar los equipos más críticos de la instalación, con el fin de destinar la mayor parte de los recursos disponibles en su mantenimiento.

1.2. Objetivos

Los principales objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster son los siguientes:

- 1) Describir el proceso de funcionamiento de una planta de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa y los equipos que intervienen en el mismo.
- 2) Identificar los equipos más críticos de la instalación mediante la realización de un análisis de criticidad.
- 3) Planificar las tareas de mantenimiento que se aplicarán a cada uno de los equipos de la planta, detallando las tareas predictivas, definiendo las gamas de mantenimiento preventivo y describiendo el proceso de gestión del mantenimiento correctivo.
- 4) Presentar diferentes herramientas de análisis que ayudarán a evaluar la gestión del mantenimiento planificado.

1.3. Estructura y planteamiento

El presente Trabajo Fin de Máster ha sido estructurado y desarrollado en los siguientes siete capítulos:

- ❖ Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- ❖ Capítulo 2. Descripción del proceso y de la instalación.
- ❖ Capítulo 3. Relación de equipos de la instalación.
- ❖ Capítulo 4. Análisis de criticidad.
- ❖ Capítulo 5. Plan de mantenimiento.
- ❖ Capítulo 6. Herramientas de análisis.
- ❖ Capítulo 7. Conclusiones.

En el Capítulo 1 se recogen los objetivos iniciales del trabajo y se presenta la estructura utilizada para desarrollar el trabajo.

En el Capítulo 2 se introduce el concepto de ósmosis inversa. Se realiza una descripción del proceso de funcionamiento de la planta y de los distintos elementos funcionales que componen la instalación. El proceso abarca la captación de agua de mar, las diversas etapas del pretratamiento, el proceso de ósmosis inversa y las etapas de post-tratamiento. Además, se describen los elementos de instrumentación instalados en la planta para controlar el proceso productivo. Se explica su funcionamiento y se detalla la ubicación de cada uno dentro de la instalación.

En el Capítulo 3 se detallan todos los equipos presentes en la instalación y se organizan en diferentes categorías. En cada categoría se incluyen los equipos del mismo tipo, es decir, habrá una categoría de depósitos, de bombas, de agitadores y una última que engloba al resto de equipos que no entrarían en ninguna de las anteriores. En cada categoría se recogen los datos más relevantes de cada uno de los equipos.

En el Capítulo 4 se establece un procedimiento para valorar la criticidad de los distintos equipos y se realiza un análisis de criticidad. Además, se elabora una clasificación de los equipos en función de su criticidad para determinar las técnicas de mantenimiento que se aplicarán a cada uno de los equipos de la instalación.

En el Capítulo 5 se desarrolla el plan de mantenimiento, basado en los tres tipos de mantenimiento: predictivo, preventivo y correctivo. En primer lugar se define el mantenimiento predictivo y se citan sus principales ventajas e inconvenientes. Se describen las diferentes técnicas predictivas que serán de aplicación para el mantenimiento de los equipos críticos. Además, se detallan las técnicas predictivas que se aplicarán a cada uno de los equipos críticos. En segundo lugar se introduce el mantenimiento preventivo y se mencionan sus ventajas e inconvenientes más importantes. Se definen las diferentes gamas de mantenimiento preventivo en base a unos intervalos de tiempo establecidos. En tercer lugar se comenta brevemente en que consiste el mantenimiento correctivo y sus ventajas y desventajas más destacadas. Se define el organigrama del personal de mantenimiento y se detallan las funciones que desempeñará cada miembro del mismo. Se establecen los elementos que constituirán el stock de repuestos. También se describe el proceso de documentación de incidentes y tareas de mantenimiento. Además, se describen las causas que originan la mayoría de los fallos y se proponen una serie de medidas para actuar sobre ellas. Por último, se explica en que consiste un software GMAO, se describen brevemente sus funciones más importantes y sus módulos principales y se resumen las ventajas que nos proporciona su uso.

En el Capítulo 6 se presentan tres herramientas de análisis con el objetivo de analizar y evaluar la gestión del mantenimiento desarrollado. Se describen los principios o fundamentos en los que se basan cada una de ellas. Además, se realizan ejemplos de aplicación de cada una de las herramientas sobre casos reales, con el objetivo de mostrar su utilidad de una manera más ilustrativa.

En el Capítulo 7 se aportan las conclusiones obtenidas en base a los objetivos planteados y las conclusiones derivadas del análisis de la gestión del mantenimiento desarrollado.

Capítulo 2

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y DE LA INSTALACIÓN

2.1. Introducción

La instalación para la cual se llevará a cabo la planificación del mantenimiento consiste en una planta desaladora de agua de mar de 40000 m³/día para la obtención de agua potable. El proceso de desalación se realizará mediante ósmosis inversa.

Cuando dos fluidos con diferentes concentraciones se ponen en contacto, ambos tienden a mezclarse hasta que su concentración sea uniforme. Si estos fluidos se encuentran separados por una membrana semipermeable, que solo permite el paso de uno de los fluidos, el fluido con menor concentración será el que se moverá a través de dicha membrana, disminuyendo así la concentración del fluido más concentrado inicialmente. Este fenómeno es conocido como ósmosis. En la Figura 1 se muestra el fenómeno de ósmosis y se puede apreciar como el fluido menos concentrado fluye a través de la membrana originando una diferencia de altura entre ambos fluidos. Esta diferencia de altura es conocida como presión osmótica.

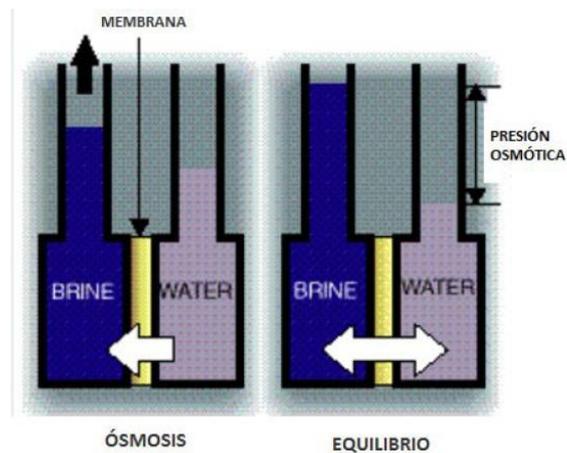


Figura 1. Diagrama de ósmosis.

Si sobre el fluido más concentrado se aplica una presión superior a la presión osmótica, ocurre el efecto contrario. El fluido más concentrado es el que se mueve a través de la membrana, que retiene los sólidos disueltos. Este fenómeno se denomina ósmosis inversa, y es el método que emplea la instalación considerada en este trabajo para la desalinización del agua mar. Mediante esta técnica, se obtiene una corriente con baja concentración, denominada permeado, y otra con alta concentración, denominada rechazo.

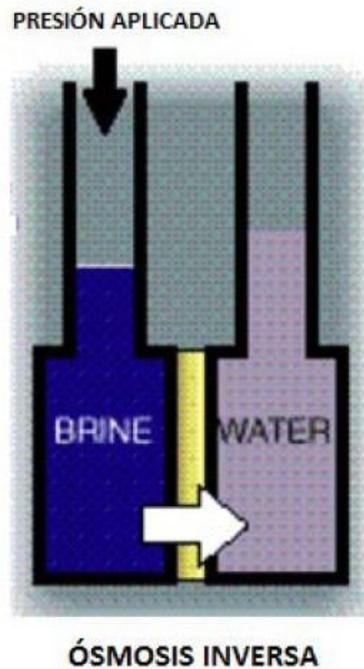


Figura 2. Diagrama de ósmosis inversa.

Sin embargo, para desalinizar el agua de mar es necesario tratar el agua antes de que llegue a las membranas de ósmosis inversa, ya que estas son muy sensibles y pueden ensuciarse, obstruirse o incluso perforarse como consecuencia de los sólidos y microorganismos presentes en el agua de mar. Además, será necesario también realizar un post-tratamiento al agua una vez desalinizada, para que alcance la calidad requerida para su consumo.

2.2. Toma de agua de mar

La captación de agua marina es el inicio de todo proceso de desalinización. En la actualidad los sistemas de captación más empleados se pueden clasificar en:

- Tomas abiertas.
- Pozos verticales.
- Drenes horizontales.
- Tomas mixtas.

La selección del tipo de sistema de captación dependerá de varios factores, como los requisitos de producción de la planta, las condiciones de operación y los estudios hidrogeológicos en la ubicación de la planta.

Los pozos verticales y los drenes horizontales, a diferencia de las tomas abiertas y mixtas, se caracterizan por garantizar agua de mejor calidad y más homogénea, como consecuencia de la filtración natural que realiza el propio terreno. Sin embargo, estos sistemas de captación presentan dificultades para asegurar el caudal de producción, especialmente para plantas de producción media/alta.

Las tomas abiertas son generalmente utilizadas en plantas de alta producción, en las cuales es indispensable garantizar el caudal de producción, o donde no hay posibilidad de ejecución de pozos o drenes. Como inconvenientes, la calidad del agua es peor ya que

presenta más actividad biológica y orgánica, es más vulnerable a vertidos contaminantes y variaciones de temperatura. Además, la ejecución de obras marinas y la posibilidad de realizar modificaciones en el pretratamiento según la calidad del agua conllevan un coste más elevado.

En este caso, se ha escogido un sistema de captación mediante toma abierta con el fin de garantizar la demanda de agua de la planta. Los sistemas de toma abierta constan de tres elementos principales: la torre de toma, el inmisario submarino y la cántara de captación; los cuales se detallarán a continuación.



Figura 3. Captación de agua de mar mediante una torre de toma.

2.2.1. Torre de toma

La torre de toma es una estructura sumergible por la cual se realiza la captación de agua marina. Para ello dispone de una serie de ventanas ubicadas en la parte superior de la torre para evitar la entrada de arenas. Dichas ventanas están protegidas con unas rejillas de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) que actúan de filtro para evitar la entrada de peces y sólidos. El flujo de entrada del agua en la torre es horizontal, ya que de esta manera se disminuye la succión de organismos. La conexión con el inmisario submarino se realiza a una cota superior a la de la solera con el objetivo de evitar que los sedimentos que hayan podido introducirse en la torre pasen al interior de la tubería. La torre de toma tiene 5 metros de altura y se localiza a 1500 metros de la costa, sumergida a una profundidad aproximada de 25 metros. A esta profundidad se evita la presencia de luz solar, la cual fomentaría el crecimiento biológico y de microorganismos dañinos para el proceso de ósmosis inversa.



Figura 4. Torre de toma.

2.2.2. Inmisario submarino

El inmisario submarino es el encargado de conducir el agua desde la torre de toma hasta la cántara de captación. Se trata de una tubería de 1,2 metros de diámetro, fabricada en polietileno de alta densidad (PEAD). Para su sujeción al fondo marino se disponen de lastres de hormigón armado, los cuales proporcionan estabilidad frente a las fuerzas ocasionadas por el oleaje y por las corrientes.

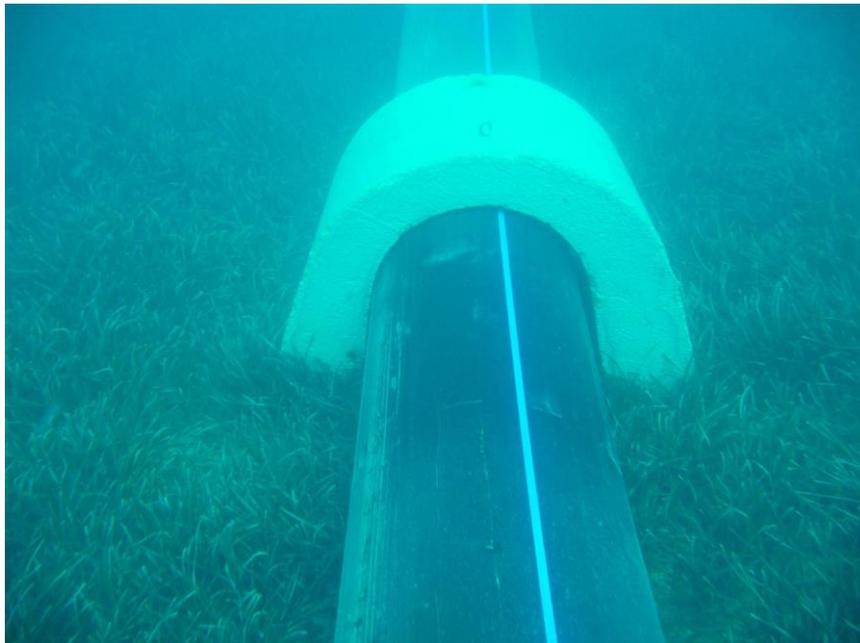


Figura 5. Inmisario submarino.



2.2.3. Cántara de captación

La cántara de captación es un depósito que se encuentra en la costa, al cual llega el agua procedente de la torre de toma, a través del inmisario submarino. Dispone de una capacidad para almacenar un volumen de 3726 m³ y está fabricado en hormigón armado. Desde dicha cántara, el agua se envía al pozo de bombeo, otro depósito que se encuentra a la entrada de la planta. El conducto por el que circula el agua hasta el pozo de bombeo tiene un diámetro interior de 1,1 metros y está fabricado en polietileno de alta densidad.

Para la impulsión del agua hacia el pozo de bombeo se disponen de cinco bombas sumergibles Sulzer modelo ABS XFP 250M-CH2 en paralelo, en disposición 4+1R, siendo una de reserva. Las bombas están equipadas con motores Premium Efficiency con categoría de eficiencia IE3. Cada una de las bombas dispone a su entrada de un filtro en línea tipo “Y” para evitar problemas ocasionados por sólidos en suspensión que pueda contener el agua. A la salida se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida, además de una válvula anti-retorno en serie con el objetivo de evitar golpes de ariete en la línea de impulsión.

2.2.4. Pozo de bombeo

El pozo de bombeo es un depósito que se encuentra a la entrada de la planta desaladora, cuya función consiste en almacenar el agua procedente de la cántara de captación antes de que esta sea enviada a los filtros de arena y antracita. Está fabricado en hormigón armado y dispone de la capacidad para almacenar un volumen de 1260 m³.

Desde el pozo de bombeo, se impulsará el agua hasta los filtros de arena y antracita mediante seis bombas sumergibles Sulzer modelo ABS XFP 200M-CH2 en paralelo, en disposición 5+1R, siendo una de reserva. Cada una de las bombas dispone a su entrada de un filtro en línea tipo Y. A la salida se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida, además de una válvula anti-retorno en serie.

2.3. Pretratamiento

Como se ha comentado anteriormente, las membranas de ósmosis inversa son muy sensibles a sufrir ciertos problemas como ensuciamiento e incrustaciones, los cuales conllevan un deterioro de las membranas pudiendo cegar secciones de la membrana, evitando así que el agua pueda permear.

Para evitar la aparición de estos problemas, es necesario tratar el agua de alimentación antes de su paso por las membranas de ósmosis inversa. De esta manera, se previene la aparición de posibles problemas durante la operación de la planta y, con ello, se disminuye el número de paradas de la instalación. Además, se consigue aumentar la vida útil de las membranas y disminuir el número de lavados.

El diseño del pretratamiento no es único para todas las plantas, ya que este dependerá en gran medida las características del agua de alimentación, como su composición química, salinidad, sistema de captación, etc.

Para esta planta, el pretratamiento necesario estará compuesto por los siguientes procesos:

- Desinfección.
- Acidificación.



- Coagulación.
- Filtración de arena y antracita.
- Decoloración.
- Antiincrustante.
- Filtración de cartuchos.

2.3.1. Desinfección

El proceso de desinfección consiste en eliminar los microorganismos presentes en el agua de alimentación, con el objetivo de prevenir el ensuciamiento de las membranas provocado por la acumulación de los restos biológicos presentes en el agua. El producto más empleado para procesos de desinfección es el hipoclorito de sodio (NaClO), ya que se trata de un compuesto fuertemente oxidante, económico y de fácil adquisición. Para esta planta se empleará una solución de hipoclorito de sodio al 13% (160 mg/L).

Para la dosificación del hipoclorito de sodio se dispone de un depósito capaz de cubrir las necesidades de la instalación durante al menos 15 días, teniendo en cuenta que también hay que clorar el agua permeada en el post-tratamiento, como se verá más adelante. Dicho depósito tiene un volumen útil de 40 m^3 y está fabricado en PRFV. A la salida del depósito se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida. La dosificación se realizará a la salida del pozo de bombeo, que se encuentra en el edificio de bombeo.

Para la impulsión del hipoclorito de sodio se instalarán dos bombas dosificadoras de diafragma de la marca JESCO modelo MEMDOS E/DX 160 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. Estas bombas son capaces de dosificar un caudal de hasta 110 L/h. Las líneas de dosificación serán DN10 de polietileno de alta densidad. A la entrada de cada bomba se dispone de una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de hipoclorito de sodio se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del caudal de entrada a la planta.

2.3.2. Acidificación

La acidificación se utiliza para corregir el pH del agua mediante la adición de un ácido. El objetivo que se persigue es reducir el pH para evitar la precipitación de sales como el carbonato cálcico, evitando así posibles daños en las membranas de ósmosis. El ácido más comúnmente usado para este tipo de procesos es el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Para esta planta se empleará ácido sulfúrico al 98%.

Para la dosificación del ácido sulfúrico se instalará un depósito con un volumen de 15 m^3 fabricado en polipropileno de alta densidad. El depósito debe tener una capacidad para cubrir las necesidades de la instalación durante al menos 15 días de funcionamiento. Debido a la peligrosidad del producto, el depósito estará colocado en el interior de un cubeto de retención, recubierto interiormente de loseta antiácida. La capacidad del cubeto debe ser igual o superior a la del depósito. Se ubicará en un lugar abierto para impedir la acumulación de gases tóxicos. A la salida del depósito se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida. La dosificación del ácido sulfúrico se realizará entre el pozo de bombeo y los filtros de arena-antracita.

Para la impulsión del ácido sulfúrico se instalarán dos bombas dosificadoras de diafragma de la marca JESCO modelo MEMDOS E/DX 50 en paralelo, en disposición 1+1R,



siendo una de reserva. Estas bombas son capaces de dosificar un caudal de hasta 41 L/h. Las líneas de dosificación serán DN10 de polietileno de alta densidad. A la entrada de cada bomba se dispone de una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de ácido sulfúrico se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del pH y del caudal de entrada a la planta.

2.3.3. Coagulación

La coagulación es un proceso en el que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto. Esto es producido por la adición de un coagulante, que provoca la desestabilización eléctrica de los coloides y la reagrupación de estos y de partículas más pequeñas presentes en el agua, facilitando así su posterior separación. El coagulante utilizado en esta planta es cloruro férrico (FeCl_3) al 40% de riqueza.

Para su dosificación se dispondrá de un depósito con un volumen de 25 m³ fabricado en PRFV. A la salida del depósito se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida. La dosificación se realizará entre el pozo de bombeo y los filtros de arena y antracita.

Para la impulsión del cloruro férrico se dispondrá de dos bombas dosificadoras de la marca JESCO modelo MEMDOS E/DX 75/76 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. Estas bombas son capaces de dosificar un caudal de hasta 64 L/h. Las líneas de dosificación serán DN10 de polietileno de alta densidad. A la entrada de cada bomba se dispone de una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de cloruro férrico se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del caudal de entrada a la planta.

2.3.4. Filtración de arena y antracita

El proceso de filtración de arena y antracita tiene la finalidad de reducir la cantidad de coloides y partículas en suspensión del agua de alimentación, reduciendo el índice de densidad de sedimentos (SDI) por debajo de 5. De esta manera, se reduce el riesgo de que las membranas de ósmosis sufran daños. Debido a que este proceso se realiza de manera continua, llegará un momento en el que los filtros se colmatarán, manifestando una pérdida de presión, y será necesario limpiarlos.

Los filtros de arena que se utilizan en las instalaciones son generalmente a presión, y se colocan en paralelo. En este caso se dispondrán de seis filtros horizontales de 51 m² de superficie filtrante por unidad, en disposición 5+1R, con un filtro de reserva para realizar el lavado de forma individual, sin tener que detener la instalación. Los filtros serán del fabricante Degremont, fabricados en acero galvanizado y con carcasa recubierta interiormente de material plástico para evitar la corrosión.

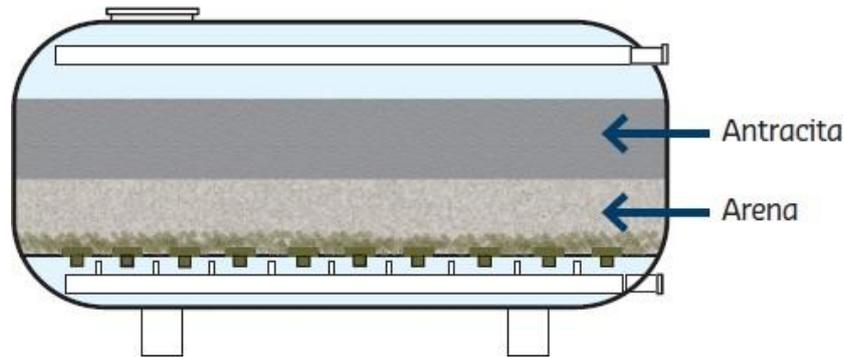


Figura 6. Filtros de arena-antracita.

Dentro del filtro, el agua se mueve en sentido vertical, introduciéndose por la parte superior y descendiendo a través de las capas filtrantes, que retienen los sólidos y partículas en suspensión. Finalmente, el agua filtrada se recoge en un colector provisto de boquillas que se encuentra ubicado en la parte inferior del filtro.

La limpieza de los filtros se realiza con aire y agua, los cuales se introducen por la parte inferior del filtro, por debajo del material filtrante, y en un movimiento ascendente arrastran los sólidos y materiales que obstruyen el filtro. El agua de limpieza se evacua por la parte superior del filtro y se conduce hasta el decantador.

A la entrada de cada uno de los filtros se dispone de una válvula de cierre (on/off) en serie con una válvula de bola para regular el caudal de entrada. En la salida de cada filtro se dispone de una válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno.

Para la limpieza con agua se instalará una bomba de la marca SULZER modelo AHLSTAR W RANGE TYPE WPP/T, capaz de impulsar un caudal de 918 m³/h a una presión de 4 bares. A la entrada de la bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y, en serie con una válvula de cierre (on/off) y una válvula de mariposa para regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de una válvula de mariposa, en serie con una válvula anti-retorno.

Para la limpieza con aire se dispone de una soplante capaz de impulsar un caudal de 2550 m³/h de aire. A la entrada de la misma se encuentra un filtro en línea tipo Y para prevenir la entrada de sólidos en suspensión.

2.3.5. Decloración

La función de la decloración es eliminar la presencia de agentes oxidantes, como por ejemplo el cloro proveniente del proceso de desinfección con hipoclorito sódico, ya que son muy agresivos y pueden dañar seriamente las membranas de ósmosis inversa. Para la decloración se emplea bisulfito sódico (NaHSO₃), un excelente agente reductor.

Para la dosificación se instalarán dos depósitos agitados en paralelo con un volumen de 10 m³ cada uno, fabricados en PRFV. Así se permitirá la preparación del producto en uno de ellos cuando el otro comienza a agotarse. A la salida de ambos depósitos agitadores se dispone de una válvula de bola en serie con una válvula anti-retorno. Los agitadores son de tipo turbina de tres palas de acero inoxidable AISI 316L. En nuestro caso, se instalará la dosificación entre los filtros de arena y antracita y la filtración de cartuchos, con el objetivo de incrementar la eficacia de la decloración.



Para la impulsión del bisulfito sódico se instalarán dos bombas dosificadoras de diafragma de la marca JESCO modelo MEMDOS E/DX 160 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y y una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de bisulfito sódico se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del caudal de entrada a la planta.

2.3.6. Antiincrustante

La aplicación de antiincrustantes tiene como finalidad evitar la precipitación de sales que puedan dañar las membranas y reducir el rendimiento de la instalación. Se trata de productos muy efectivos, los cuales son absorbidos por los cristales de sal, impidiendo su crecimiento y, por tanto, que alcancen el tamaño suficiente para precipitar. El Antiincrustante empleado en esta planta es el hexametáfosfato sódico (HMP), uno de los más utilizados en este tipo de procesos.

Para la dosificación se instalarán dos depósitos agitados en paralelo con un volumen de 2,5 m³ cada uno, fabricados en PRFV. Así se permitirá la preparación del producto en uno de ellos cuando el otro comienza a agotarse. A la salida de ambos depósitos agitadores se dispone de una válvula de bola en serie con una válvula anti-retorno. Los agitadores son de tipo turbina de tres palas de acero inoxidable AISI 316L.

Para la impulsión del hexametáfosfato sódico se instalarán dos bombas dosificadoras de diafragma de la marca JESCO modelo MEMDOS E/DX 50 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y y una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de HMP se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del caudal de entrada a la planta.

2.3.7. Filtración de cartuchos

La filtración de cartuchos constituye la última etapa del pretratamiento y está ubicada antes de los bastidores de ósmosis inversa. La finalidad de esta etapa es evitar el paso de las partículas más pequeñas hacia las membranas de ósmosis. Estos filtros impedirán el paso de las partículas con un tamaño superior a cinco micras, que es el requerido por los fabricantes de membranas.

Se compone de una serie de depósitos metálicos, recubiertos interiormente de material plástico para evitar la corrosión, los cuales utilizan como medio filtrante unos cartuchos de polipropileno o plástico. Los filtros se colmatan periódicamente por lo que serán sustituidos cuando la pérdida de carga supere 1 bar de presión. El flujo de agua recorre los cartuchos desde la parte exterior inferior hacia el eje en el que se recoge el agua filtrada y sale por su parte superior.

Para la filtración se instalarán ocho filtros de cartucho en paralelo, en disposición 7+1, siendo uno de reserva. Los filtros serán de la marca PUTSCH y estarán fabricados en acero inoxidable AISI 316L, tal y como se muestra en la Figura 7. A la entrada de cada uno de los filtros se dispone de una válvula de cierre (on/off) en serie con una válvula de bola para regular el caudal de entrada. En la salida de cada filtro se dispone de una válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno.

Finalmente, el agua pretratada se almacenará en un depósito fabricado en hormigón armado y con un volumen de 1260 m³. Dicho depósito se encuentra a la salida de la filtración de cartuchos, desde el cual se bombeará el agua hacia los bastidores de ósmosis inversa.



Figura 7. Filtros de cartucho.

2.4. Ósmosis inversa

En el proceso de ósmosis inversa se produce la separación del agua de alimentación en dos corrientes diferentes. Una con baja concentración de sales, denominada permeado, y otra con alta concentración de sales, denominada rechazo. Para ello, se utilizan unas membranas semipermeables, tal y como se ha explicado en la introducción del presente Capítulo. Para que se produzca el efecto de ósmosis inversa con un rendimiento adecuado, el agua de alimentación debe ser bombeada hasta las membranas de ósmosis con una presión muy elevada.

Una vez obtenidas ambas corrientes, el agua permeada se almacenará en un depósito fabricado en hormigón armado y con un volumen de 1260 m³, el cual se ubicará a la salida de los bastidores de ósmosis. Por su parte, la corriente de agua rechazada será conducida hasta el decantador.

La corriente de rechazo se hace pasar por una turbina Pelton, que aprovechará la presión del agua para recuperar la mayor cantidad de energía posible. Así, se logra reducir el consumo energético de la planta, disminuyendo la energía a aportar en el bombeo de alta presión.

2.4.1. Bombeo de alta presión

Para lograr el caudal de entrada necesario, el agua de alimentación será impulsada a una presión de 59,04 bares. Para ello se instalarán cinco bombas de alta presión multietapa de cámara partida en paralelo, en disposición 4+1R, siendo una de reserva. Las bombas serán de la marca SULZER modelo MSD-RO de acero superduplex con alta resistencia a la corrosión. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y y de una válvula de bola para



poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno.

2.4.2. Bastidores de ósmosis inversa

Para esta planta se ha diseñado una instalación compuesta por ocho bastidores de ósmosis inversa, cada uno de los cuales contiene cuarenta y cuatro tubos de presión, y cada tubo de presión contiene a su vez siete membranas semipermeables.

Cada tubo de presión está formado por dos membranas del fabricante DOW FILMTEC modelo SW30HRLE-440i a la entrada y cinco membranas modelo SW30ULE-440i. Para un caudal de entrada de 3704 m³/h se obtiene un caudal de permeado de 1666,67 m³/h y un caudal de rechazo de 2036,71 m³/h.

A la entrada de cada bastidor de ósmosis se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de entrada. A la salida, tanto para la corriente de agua permeada como para la de agua rechazada, se dispone de una válvula de bola para regular el caudal de salida.

2.5. Post-tratamiento

En el post-tratamiento se realiza la remineralización del agua permeada con la finalidad de hacerla apta para el consumo humano. Para ello, se debe aumentar la dureza cálcica y la alcalinidad del agua hasta valores que permitan alcanzar un índice de saturación (LSI) próximo a cero ($-0,5 < \text{LSI} < 0,5$).

Las diferentes técnicas disponibles que permiten remineralizar el agua son las siguientes:

- Adición de dióxido de carbono y carbonato cálcico.
- Adición de dióxido de carbono e hidróxido cálcico.
- Adición de dióxido de carbono y dolomita.
- Adición de carbonato cálcico y ácido sulfúrico.
- Adición de cloruro cálcico y bicarbonato sódico.

Las técnicas más utilizadas en la práctica son las dos primeras. Para el diseño de esta planta se ha optado por la adición de dióxido de carbono y carbonato cálcico.

2.5.1. Adición de dióxido de carbono

El primer paso de la remineralización consistirá en realizar la dosificación de CO₂. Para ello el agua permeada deberá atravesar los disolvedores de CO₂ de baja presión. Se instalarán seis disolvedores en paralelo, en disposición 5+1R, siendo uno de reserva. En ellos el CO₂ se dosificará a contracorriente. La velocidad del agua en el disolvedor debe mantenerse en 0,07 + 0,02 m/s para evitar así el arrastre de burbujas. La presión diferencial del agua y la del gas debe ser del orden de 0,25 bares. Además, los disolvedores contarán con difusores de CO₂, con un tamaño de poros que permita la dosificación con una pérdida de carga mínima. Se debe disponer de un número suficiente de difusores para garantizar una dosificación correcta aún a dosis elevadas. Cada dosificador dispondrá de dispositivos interiores que faciliten la mezcla de las burbujas de CO₂. También contarán con visor de burbujas, el cual está situado a lo largo de la pared del tanque como una franja semitransparente que permite visualizar el CO₂ no disuelto.



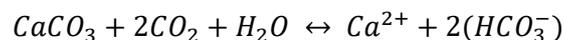
Figura 8. Disolvedores de CO₂ a baja presión.

El CO₂ se encuentra almacenado en un depósito con un volumen de 13 m³ fabricado en AISI 304L.

Para la impulsión del agua desde el tanque de agua permeada hacia los disolvedores de CO₂ se dispondrán de 2 bombas centrífugas SULZER modelo ABS XFP 250M-CH2 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y además de una válvula de mariposa para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de mariposa, en serie con una válvula anti-retorno.

2.5.2. Adición de carbonato cálcico

Una vez realizada la adición de dióxido de carbono, se encuentra una etapa de filtración en lechos de calcita donde se realizara la adición de carbonato cálcico. En esta etapa se produce la siguiente reacción química:



Mediante esta reacción se consigue aumentar el pH y la dureza del agua hasta alcanzar un equilibrio químico. Una vez que el agua ha fluido a través del lecho, esta sale por un rebosadero perimetral. Finalmente, el agua desbordada se canaliza hasta la salida, ubicada en un lado del tanque. Como material filtrante, se ha empleado calcita granulada con pureza del 99% y tamaño de partículas entre uno y cuatro milímetros.

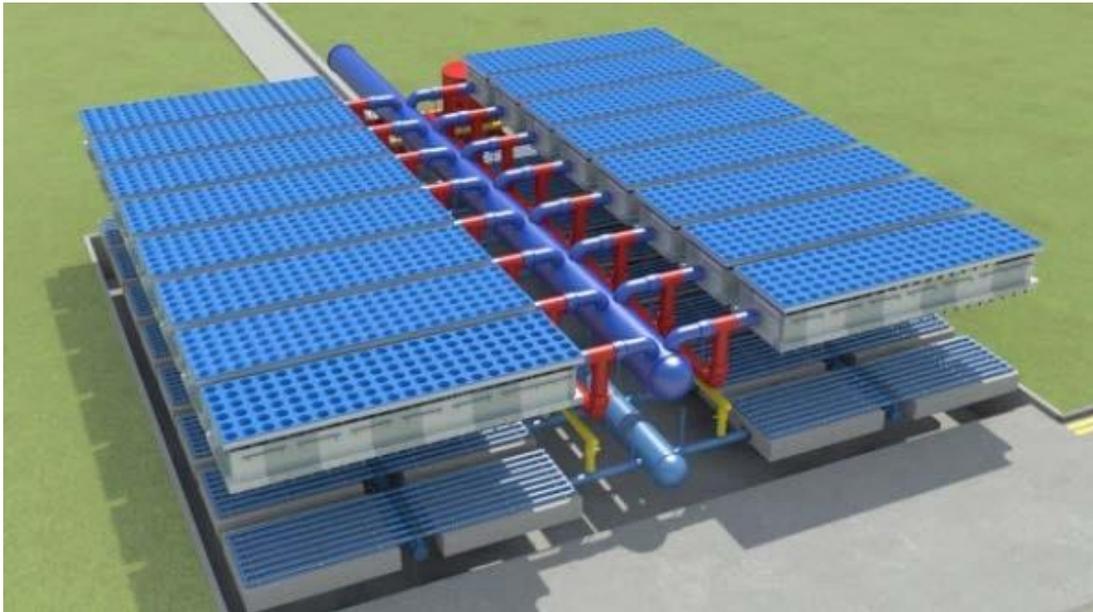


Figura 9. Lechos de calcita.

Se instalarán siete lechos de calcita en paralelo, en disposición 6+1R, siendo uno de reserva. Los lechos tendrán unas dimensiones de 2,5 x 8 x 3 metros. Por cada uno de ellos circulará un caudal unitario de 277,78 m³/h a una velocidad máxima de 15 m/h. Tanto en la entrada como en la salida de dispondrá de una válvula de bola para regular los caudales.

Tras realizar la adición de carbonato cálcico, el agua permeada requiere la adición de hipoclorito sódico, con la finalidad de eliminar los microorganismos patógenos, ya que suponen un riesgo para la salud de los consumidores. La adición de hipoclorito sódico se realizará desde el mismo depósito que alimenta el proceso de desinfección.

2.5.3. Almacenamiento de agua potable

El agua potable producida en la planta se almacenará en dos depósitos, los cuales tendrán un volumen de 15000 m³ cada uno. Ambos depósitos tienen 26 metros de diámetro y 30 metros de alto y están fabricados en hormigón armado. Los depósitos contarán con válvulas de bola a la entrada y a la salida para regular el caudal.

Para la impulsión del agua desde la salida de los lechos de calcita hasta los depósitos de agua potable se dispondrán de 2 bombas centrífugas SULZER modelo ABS XFP 250M-CH2 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y, además de una válvula de mariposa para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de mariposa, en serie con una válvula anti-retorno.



Figura 10. Depósitos de agua potable.

2.5.4. Tratamiento de aguas rechazadas y de limpieza

Se dispone de un depósito decantador para almacenar el agua rechazada, neutralizar y recoger los posibles fangos producidos por la deposición de las incrustaciones retiradas de los filtros y las membranas tras la limpieza. Se trata de un depósito con el fondo cónico y fabricado en hormigón armado. Tiene un volumen útil de 1000 m³, capaz de almacenar el agua rechazada por la planta a pleno rendimiento durante 30 minutos.

Los posibles elementos flotantes serán recogidos mediante un skimmer, mientras que los fangos producidos por el fondo cónico serán enviados por gravedad hasta un equipo de centrifugación que los separará del agua. Los fangos se enviarán mediante un tornillo sin fin a una cuba de recogida de fangos, mientras que el agua líquida se recirculará hasta el decantador. Por la zona intermedia del decantador se captará el agua de rechazo, exenta de fangos y neutralizada para ser enviada al mar mediante el emisario submarino.

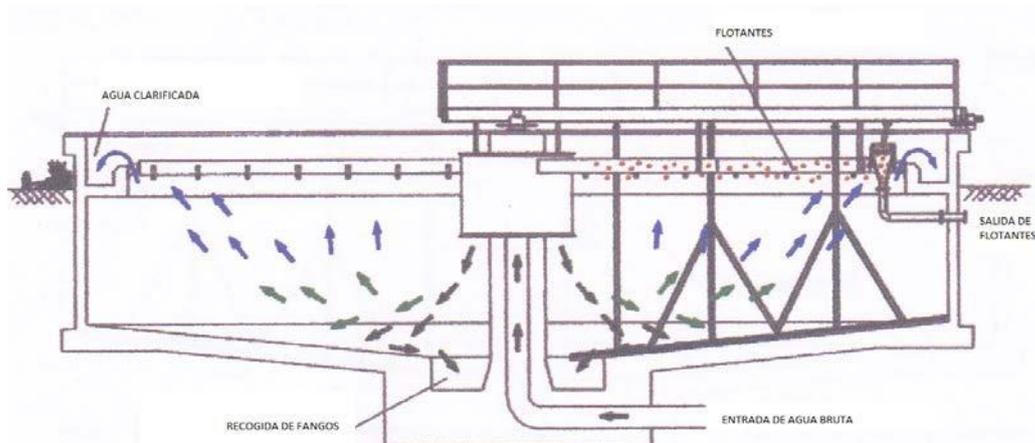


Figura 11. Decantador de agua residual.

La neutralización se realizará mediante la adición de una solución de HCl al 37% y otra solución de NaOH al 50%. Para la dosificación de cada uno de los productos se instalará un depósito con un volumen de 3 m³ y fabricado en PRFV. Para la impulsión de cada una de las soluciones se instalarán dos bombas dosificadoras de diafragma de la marca JESCO modelo

MEMDOS E/DX 50 en paralelo, en disposición 1+1R, siendo una de reserva. A la entrada de cada bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y y de una válvula de bola para poder regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de otra válvula de bola, en serie con una válvula anti-retorno. La adición de cada solución se regulará mediante un variador de frecuencia que actuará en función del caudal de entrada a la planta.

2.5.5. Emisario submarino

El agua rechazada y de limpieza obtenida en la planta se emitirá al mar mediante un emisario submarino que estará fabricado en polipropileno de alta densidad. La longitud del mismo será de 1500 metros, tendrá un diámetro de 1,1 metros y la velocidad máxima de circulación por el emisario será de 1 m/s.

Con el objetivo de minimizar el impacto ambiental durante la implantación del emisario submarino, se han tenido en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Evitar las curvas.
- Mantener una pendiente razonable, para evitar acumulaciones de suciedad o sólidos.
- Asegurar la estabilidad del emisario.
- Proteger al emisario contra los impactos.
- Prestar especial atención en la zona de rompientes.

Además de las recomendaciones anteriores, una parte del agua de la cántara de captación es recirculada para reducir la concentración del agua emitida al mar, con el fin de minimizar el impacto sobre la fauna marina.

Para la impulsión del agua desde el decantador hacia el emisario submarino se instalarán cuatro bombas centrifugas del fabricante SULZER modelo AHLSTAR W RANGE TYPE WPP/T en paralelo, en disposición 3+1R, siendo una de reserva. A la entrada de la bomba se dispone de un filtro en línea tipo Y, en serie con una válvula de mariposa para regular el caudal de entrada. A la salida se dispone de una válvula de mariposa, en serie con una válvula anti-retorno.



Figura 12. Emisario submarino.

El emisario dispondrá de 14 difusores, repartidos en dos conductos en forma de Y, con una separación entre ellos de tres metros. Los difusores tendrán una inclinación de 45 grados con respecto a la línea de costa y se han diseñado para que la velocidad máxima de descarga por los orificios sea de 5 m/s, de modo que los diámetros de los orificios serán de 0,13 metros.



Figura 13. Difusor del emisario submarino.

2.6. Instrumentación

Para garantizar el correcto funcionamiento de la planta se instalarán una serie de instrumentos capaces de medir, transferir y controlar todas las variables que intervienen en el proceso productivo, con el objetivo de optimizar los recursos empleados y evitar posibles accidentes en la planta. Los instrumentos que se utilizan son los siguientes:

- Transmisor e indicador de presión.
- Transmisor e indicador de presión diferencial.
- Transmisor de nivel.
- Sensor de nivel.
- Transmisor e indicador de caudal.
- Transmisor e indicador de temperatura.
- Transmisor e indicador de conductividad.
- Transmisor e indicador de pH.
- Medidor de potencial redox.

2.6.1. Transmisor e indicador de presión

Este instrumento mide la presión en un punto y transforma la señal de presión a una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. También permite visualizar la presión en campo, no exclusivamente desde la sala de control. Se dispone de estos instrumentos en los siguientes puntos de la planta:

- Línea de impulsión de las bombas de la cántara de captación.
- Línea de impulsión de las bombas del pozo de bombeo.
- Línea de impulsión de las bombas de alta presión.
- Salida de los bastidores de ósmosis inversa.
- Entrada de la turbina Pelton.
- Línea de impulsión de las bombas del depósito de agua permeada.
- Línea de impulsión de las bombas de los lechos de calcita.
- Línea de impulsión de las bombas del decantador hacia el emisario submarino.
- Línea de impulsión de la bomba de limpieza de los filtros de arena.
- Línea de impulsión de la bomba de limpieza de las membranas de ósmosis inversa.
- Depósitos de CO₂.
- Entrada a los disolvedores de CO₂.

Los transmisores e indicadores instalados en la línea de impulsión de las bombas de alta presión están conectados a un bucle de control, de manera que si la presión se encuentra fuera de un rango establecido, se pueda actuar sobre las condiciones de funcionamiento de la bomba, pudiendo incluso provocar su parada. El objetivo que se persigue es evitar fenómenos que puedan dañar los equipos de bombeo, como la cavitación en la aspiración o la sobrepresión en la impulsión.



Figura 14. Transmisor e indicador de presión.

2.6.2. Transmisor e indicador de presión diferencial

Este instrumento mide la presión en dos puntos y transmite la diferencia de presión entre ambos como una señal eléctrica de 4-20 mA. Se instala en aquellos equipos en los cuales es necesario realizar tareas de limpieza o sustitución cuando se alcanza una determinada pérdida de presión. En esta planta se encuentra instalado en los siguientes equipos:

- Filtros de arena y antracita.
- Filtros de cartuchos.

También se podrían haber instalado estos dispositivos en los bastidores de ósmosis inversa, sin embargo, se ha optado por instalar transmisores e indicadores de presión individuales en la entrada y en la salida.

2.6.3. Transmisor de nivel

Un transmisor de nivel indica el nivel exacto de líquido presente en un depósito y transforma la señal de medida a una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. La planta dispone de estos instrumentos en los siguientes depósitos:

- Cántara de captación.
- Pozo de bombeo.
- Depósito de hipoclorito de sodio (NaClO).
- Depósito de ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- Depósito de cloruro férrico (FeCl_3).
- Depósito de agua pretratada.
- Depósito de agua permeada.



- Depósito de CO₂.
- Disolvedores de CO₂.
- Decantador.
- Depósitos de agua potable.

2.6.4. Sensor de nivel

Los sensores de nivel se emplean para controlar el nivel de líquido en los depósitos. Se instalan dos sensores por depósito, uno para indicar el nivel máximo y otro para indicar el nivel mínimo. Ambos sensores llevan asociada una alarma que se activará en caso de que el nivel de líquido alcance cualquiera de los límites, con el propósito de alertar en la sala de control. Los sensores de nivel se encuentran instalados en los siguientes depósitos:

- Cántara de captación.
- Pozo de bombeo.
- Depósito de hipoclorito de sodio (NaClO).
- Depósito de ácido sulfúrico (H₂SO₄).
- Depósito de cloruro férrico (FeCl₃).
- Depósitos de bisulfito sódico (NaHSO₃).
- Depósitos de hexametáfosfato sódico (HMP).
- Depósito de agua pretratada.
- Depósito de agua permeada.
- Disolvedores de CO₂.
- Lechos de calcita.
- Decantador.
- Depósitos de neutralización.
- Depósitos de agua de limpieza.
- Depósitos de agua potable.

2.6.5. Transmisor e indicador de caudal

Se emplea para medir el caudal en un punto y transformar la señal de caudal en una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. Para esta planta se han empleado caudalímetros electromagnéticos. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la tensión inducida por un líquido conductor al atravesar un campo magnético perpendicular al sentido de circulación del líquido. Para realizar la medición se colocan dos electrodos en contacto con el líquido y perpendiculares al campo magnético. La tensión inducida será proporcional a la velocidad del líquido. Los caudalímetros se encuentran instalados en los siguientes puntos de la planta:

- Línea de impulsión de las bombas del pozo de bombeo.
- Entrada a los bastidores de ósmosis inversa.
- Líneas de agua permeada.
- Entrada a la turbina Pelton.
- Línea de agua rechazada en la entrada al decantador.



Figura 15. Caudalímetro electromagnético.

2.6.6. Transmisor e indicador de temperatura

Se emplea para medir la temperatura de un punto y transformar la señal de temperatura en una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. Se encuentra instalado en los siguientes puntos de la planta:

- Entrada a la cántara de captación.
- Entrada a los bastidores de ósmosis inversa.

2.6.7. Transmisor e indicador de conductividad

Se emplea para medir la cantidad de sales disueltas en el agua y transformar la señal de medida en una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. También permite su visualización en campo. Se trata de un instrumento sencillo, de gran precisión y que no necesita calibración. Se encuentra instalado en los siguientes puntos de la planta:

- Cántara de captación.
- Pozo de bombeo.
- Alimentación de los filtros de cartucho.
- Entrada a los bastidores de ósmosis inversa.
- Líneas de agua permeada.
- Entrada a la turbina Pelton.
- Depósitos de neutralización.
- Línea al emisario submarino.
- Líneas de agua potable.

2.6.8. Transmisor e indicador de pH

Se emplea para medir el pH de una solución y transformar la señal de medida en una señal eléctrica de 4-20 mA, la cual es enviada a la sala de control. También permite su visualización en campo. Dispone de un diafragma de PTFE para evitar que se ensucie u obstruya, consiguiendo así alargar su vida útil. Se encuentra instalado en los siguientes puntos de la planta:

- Cántara de captación.
- Pozo de bombeo.



- Alimentación de los filtros de cartucho.
- Entrada a los bastidores de ósmosis inversa.
- Líneas de agua permeada.
- Depósitos de neutralización.
- Líneas de agua potable.

2.6.9. Medidor de potencial redox

Se emplea para medir el potencial de oxidación o reducción de una solución. El principio de funcionamiento consiste en determinar la diferencia de potencial que se produce entre un electrodo de referencia y un electrodo de medición. Debido a que los electrodos no deben reaccionar con el medio, se fabrican usando metales nobles. Cuando tiene lugar la reacción de oxidación o reducción en el medio, se produce un intercambio de electrones. Esto se traduce en una caída de tensión que se mide con un potenciómetro y nos proporciona un valor en mV. Los medidores de potencial redox están instalados a la entrada de los filtros de cartucho.

Capítulo 3

3. RELACIÓN DE EQUIPOS DE LA INSTALACIÓN

3.1. Introducción

En este apartado se procede a identificar y organizar todos los equipos presentes en la instalación y que intervienen en el proceso productivo, con el objetivo posterior de analizar la criticidad y planificar el mantenimiento de cada uno de ellos. La planta está compuesta principalmente por depósitos, bombas, agitadores, filtros y otros equipos como se detallará a continuación.

3.2. Depósitos

Los datos más importantes de cada uno de los depósitos instalados en la planta se encuentran recogidos en la Tabla 1.

Designación	Fluido	Volumen (m3)	Material	Notas
D-001	Agua bruta	3726	Hormigón	Cantara de captación
D-002	Agua bruta	1260	Hormigón	Pozo de bombeo
D-003	Agua pretratada	1260	Hormigón	Depósito de agua pretratada
D-004	Agua permeada	1260	Hormigón	Depósito de agua permeada
D-005 A/B	Agua producto	15000	Hormigón	Depósito de agua producto
D-006	Agua permeada	90	PRFV	Desplazamiento
D-007	Agua permeada	12	PRFV	Limpieza química
D-008	Agua rechazada	1000	Hormigón	Tanque decantador
D-009	NaClO (13%)	40	PRFV	
D-010	H2SO4 (98%)	15	PPAD	Polipropileno alta densidad
D-011	Cl3Fe (40%)	25	PRFV	
D-012 A/B	NaHSO3 (40%)	10	PRFV	
D-013 A/B	HMP (5,5%)	2,5	PRFV	
D-014	CO2 (99,9%)	13	PRFV	
D-015A/B	HCl (37%)	3	PRFV	Lavado ácido
D-016A/B	NaOH (50%)	3	PRFV	Lavado alcalino

Tabla 1. Relación de depósitos.

3.3. Bombas

Los datos más importantes de cada una de las bombas instaladas en la planta se encuentran recogidos en la Tabla 2.

Designación	Tipo	Nº	Fluido	Estado	Caudal (m3/h)	Altura (mca)	Potencia (kW)	Material
B-001 A-E	Sumergible	5	Agua bruta	Líquido	1242	50	168,1	Superduplex
B-002 A-F	Sumergible	6	Agua bruta	Líquido	720	50	134,4	Superduplex
B-003 A-E	Bomba alta presión	5	Agua pretratada	Líquido	926	588,23	1904,6	Superduplex
B-004	Turbina Pelton	1	Agua rechazada	Líquido	2036,4	555,3	-2445,2	Superduplex
B-005	Centrífuga	1	Agua rechazada	Líquido	918	40	101,9	Superduplex
B-006 A-D	Centrífuga	5	Agua rechazada	Líquido	509,25	50	62,8	Superduplex

B-007 A/B	Dosificadora	2	NaClO (13%)	Líquido	0,11	100	0,37	Teflón
B-008 A/B	Dosificadora	2	H ₂ SO ₄ (98%)	Líquido	0,041	100	0,05	Teflón
B-009 A/B	Dosificadora	2	Cl ₃ Fe (40%)	Líquido	0,064	100	0,25	Teflón
B-010 A/B	Dosificadora	2	NaHSO ₃ (40%)	Líquido	0,1185	100	0,12	Teflón
B-011 A/B	Dosificadora	2	HMP (5,5%)	Líquido	0,0273	100	0,05	Teflón
B-012 A-D	Dosificadora	4	HCl (37%)	Líquido	0,02	20	0,05	Teflón
B-013 A-D	Dosificadora	4	NaOH (50%)	Líquido	0,02	20	0,05	Teflón
B-014	Centrífuga	1	Agua permeada	Líquido	10	40	1,1	AISI 304L
B-015	Centrífuga	1	Agua de lavado	Líquido	10	40	1,1	AISI 304L
B-016A/B	Centrífuga	2	Agua permeada	Líquido	1691,1	30	180,5	Superduplex
B-017A/B	Centrífuga	2	Agua permeada	Líquido	1691,1	30	240,7	Superduplex
S-001	Soplante	1	Aire	Gas	2550	10	84	PPAD

Tabla 2. Relación de bombas.

3.4. Agitadores

Los datos más importantes de cada uno de los agitadores instalados en la planta se encuentran recogidos en la Tabla 3.

Designación	Tipo	Fluido	Estado	Potencia (kW)	Tª Operación (°C)	Material	Corresponde a
A-001	Hélice	Agua	Líquido	2,62	25	AISI 316L	D-007
A-002A/B	Hélice	NaHSO ₃ (40%)	Líquido	2,51	25	AISI 316L	D-012 A/B
A-003A/B	Hélice	HMP (5,5%)	Líquido	0,18	25	AISI 316L	D-013 A/B

Tabla 3. Relación de agitadores.

3.5. Otros equipos

Los datos más importantes del resto de equipos instalados en la planta se encuentran recogidos en la Tabla 4.

Designación	Descripción	Nº	Fluido	Estado	Potencia (kW)	Tª Operación (°C)	Material	Aislamiento
F-001 A-F	Filtro arena y antracita	6	Agua pretratada	Líquido	---	27,1	Acero galvanizado	NO
F-002 A-H	Filtro cartucho	8	Agua pretratada	Líquido	---	27,1	AISI 316L	NO
LC-001 A-G	Lecho de calcita	7	Agua permeada	Líquido	---	27,1	Hormigón	NO
T-001	Tornillo sin fin	1	Fangos	Sólido	10	27,1	Acero inoxidable	NO
CF-001	Centrífuga	1	Fangos	Líquido	20	27,1	Acero inoxidable	NO
C-001 A/B	Compresor	2	Aire	Gas	2,2	25	---	NO
DF-001 A-F	Disolvedor de CO ₂	6	CO ₂ y agua	Gas-Líquido	---	25	---	NO

Tabla 4. Relación de otros equipos.

Capítulo 4

4. ANÁLISIS DE CRITICIDAD

4.1. Introducción

Un análisis de criticidad permite evaluar y jerarquizar cada uno de los equipos presentes en la instalación en función de su impacto global. A partir de dicho análisis es posible determinar las técnicas de mantenimiento que se aplicarán a cada uno de los equipos. El objetivo que se persigue es distribuir los recursos destinados a mantenimiento de la manera más eficaz, esto es, aplicándolos sobre los sistemas o equipos más críticos.

4.2. Criterios para la criticidad

Para realizar el análisis de criticidad, el primer paso consiste en definir los criterios en los que se basará dicho análisis. De entre la gran variedad de factores que pueden tenerse en cuenta a la hora de realizar el análisis de criticidad, para nuestra instalación se han tenido en cuenta los siguientes:

- **Producción:** se trata del criterio más importante. Evalúa las consecuencias que los accidentes y averías no deseados generan sobre la disponibilidad de la planta.
- **Seguridad:** cuantifica los daños que provocan los accidentes y averías sobre las personas y los equipos de la instalación.
- **Impacto ambiental:** cuantifica los daños que provocan los accidentes y averías sobre la fauna y flora del entorno marino.

Una vez definidos los criterios de criticidad, se le asignará a cada uno de ellos una ponderación en función de su grado de importancia en cuanto a la criticidad. En la Tabla 5 se muestra la ponderación establecida para cada criterio.

Criterio	Ponderación
Producción	70%
Seguridad	15%
Impacto ambiental	15%

Tabla 5. Criterios para la criticidad.

Además, cada uno de los criterios anteriores se divide en varios grados de criticidad, con el fin de evaluar con mayor precisión el impacto que generarían los posibles incidentes o averías que se pudiesen producir. En la Tabla 6 se muestran los diferentes grados de criticidad para cada uno de los criterios.

	Producción	Seguridad	Impacto ambiental
10	Indisponibilidad total de la planta > 15 días	Pérdida de vidas humanas	Daños irreversibles en el medioambiente
9	Indisponibilidad total de la planta > 7 días	Incapacidad permanente sobre las personas	Daños muy graves en el medioambiente
8	Indisponibilidad total de la planta > 3 días	Pérdida total de la planta o Incapacidad parcial sobre las personas	Daños severos en el medioambiente a corto plazo

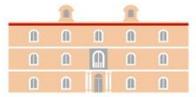
7	Indisponibilidad total de la planta > 1 día	Pérdida parcial de la planta con riesgo de daños o enfermedad grave sobre las personas	Daños severos en el medioambiente a largo plazo
6	Indisponibilidad total de la planta < 1 día	Pérdida parcial de la planta con riesgo de daños o enfermedad leve sobre las personas	Daños medios en el medioambiente a corto plazo
5	Indisponibilidad parcial de la planta > 7 días	Pérdida total o parcial de un sistema con riesgo de daños o enfermedad leve sobre las personas	Daños medios en el medioambiente a largo plazo
4	Indisponibilidad parcial de la planta > 3 días	Pérdida parcial de la planta sin riesgo para las personas	Daños leves en el medioambiente a corto plazo
3	Indisponibilidad parcial de la planta > 1 día	Pérdida total de un sistema sin riesgo para las personas	Daños leves en el medioambiente a largo plazo
2	Indisponibilidad parcial de la planta < 1 día	Pérdida parcial de un sistema sin riesgo para las personas	Daños mínimos en el medioambiente a corto plazo
1	Indisponibilidad de un ítem sin consecuencias para la planta	Pérdida de un ítem sin riesgo para las personas	Daños mínimos en el medioambiente a largo plazo
0	Sin consecuencias	Sin consecuencias	Sin consecuencias

Tabla 6. Grados de criticidad.

4.3. Análisis de criticidad

Tras haber definido los criterios para la criticidad con sus correspondientes grados, se lleva a cabo el análisis de criticidad. Para realizar dicho análisis se han dividido todos los sistemas que componen la instalación en equipos o subsistemas, los cuales serán evaluados en función del impacto que generen según los tres criterios establecidos. Finalmente, a cada subsistema se le asignará un valor de criticidad total, que será la media ponderada de los valores obtenidos en cada criterio. A continuación, en la Tabla 7, se encuentran recogidos los resultados del análisis de criticidad.

Sistema	Subsistema	CRITICIDAD						
		P	S	IA	P x 70%	S x 15%	IA x 15%	TOTAL
Torre de toma	Torre de toma	4	3	3	2,8	0,45	0,45	3,7
	Inmisario submarino	4	3	3	2,8	0,45	0,45	3,7
Cántara de captación	D-001	3	5	2	2,1	0,75	0,3	3,15
	B-001 A-E	4	5	3	2,8	0,75	0,45	4
Pozo de bombeo	D-002	4	5	3	2,8	0,75	0,45	4
	B-002 A-F	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Desinfección	D-009	5	7	4	3,5	1,05	0,6	5,15
	B-007 A/B	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Acidificación	D-010	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	B-008 A/B	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Coagulación	D-011	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	B-009 A/B	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Filtración arena y	F-001 A-F	7	6	6	4,9	0,9	0,9	6,7



antracita								
Bomba soplante	S-001	4	5	3	2,8	0,75	0,45	4
Limpieza de filtros	B-005	4	5	3	2,8	0,75	0,45	4
Decloración	A-002 A/B	3	2	4	2,1	0,3	0,6	3
	D-012 A/B	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	B-010 A/B	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Antiincrustante	A-003 A/B	3	2	4	2,1	0,3	0,6	3
	D-013 A/B	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	B-011 A/B	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Filtración de cartuchos	F-002 A-H	7	6	6	4,9	0,9	0,9	6,7
Tanque agua pretratada	D-003	6	5	2	4,2	0,75	0,3	5,25
	B-003 A-E	6	7	3	4,2	1,05	0,45	5,7
Ósmosis inversa	Membranas	8	6	7	5,6	0,9	1,05	7,55
Limpieza de membranas	D-006	4	5	4	2,8	0,75	0,6	4,15
	B-014	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
	A-001	3	2	4	2,1	0,3	0,6	3
	D-007	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	B-015	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Turbina Pelton	B-004	6	4	2	4,2	0,6	0,3	5,1
Neutralización	D-015 A/B	4	7	6	2,8	1,05	0,9	4,75
	B-012 A-D	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
	D-016 A/B	4	7	6	2,8	1,05	0,9	4,75
	B-013 A-D	5	5	5	3,5	0,75	0,75	5
Decantador	D-008	4	5	8	2,8	0,75	1,2	4,75
Emisario submarino	B-006 A-D	3	5	4	2,1	0,75	0,6	3,45
	Tubería emisario	3	3	4	2,1	0,45	0,6	3,15
Tratamiento de fangos	CF-001	3	5	0	2,1	0,75	0	2,85
	T-001	3	5	0	2,1	0,75	0	2,85
Tanque agua permeada	D-004	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
	B-016 A/B	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
Dosificación de CO2	D-014	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
	DF-001 A-F	4	5	3	2,8	0,75	0,45	4
Lechos de calcita	LC-001 A-G	4	7	1	2,8	1,05	0,15	4
	B-017 A/B	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
Tanque agua potable	D-005 A/B	4	7	1	2,8	1,05	0,15	4
Sistema de tuberías	T-001	4	3	2	2,8	0,45	0,3	3,55
	T-002	3	5	2	2,1	0,75	0,3	3,15
	T-003	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
	T-004	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
	T-005	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
	T-006	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
	T-007	5	8	3	3,5	1,2	0,45	5,15

T-008	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
T-009	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
T-010	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
T-011	4	5	0	2,8	0,75	0	3,55
T-012	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-013	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-014	4	5	4	2,8	0,75	0,6	4,15
T-015	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-016	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-017	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-018	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-019	4	7	2	2,8	1,05	0,3	4,15
T-020	4	5	2	2,8	0,75	0,3	3,85
T-021	5	7	2	3,5	1,05	0,3	4,85
T-022	5	7	2	3,5	1,05	0,3	4,85
T-023	4	7	2	2,8	1,05	0,3	4,15
T-024	4	7	2	2,8	1,05	0,3	4,15
T-025	4	7	2	2,8	1,05	0,3	4,15
T-026	4	7	2	2,8	1,05	0,3	4,15
T-027	4	7	4	2,8	1,05	0,6	4,45
T-028	4	7	6	2,8	1,05	0,9	4,75
T-029	4	7	6	2,8	1,05	0,9	4,75

Tabla 7. Análisis de criticidad.

4.4. Clasificación de equipos por criticidad

Tras realizar el análisis de criticidad, el siguiente paso consiste en clasificar los equipos en función de su criticidad total. A continuación, en la Tabla 8, se muestran los equipos ordenados de mayor a menor en función de su criticidad.

Subsistema	Criticidad total
Membranas	7,55
F-001 A-F	6,7
F-002 A-H	6,7
B-003 A-E (alta presión)	5,7
D-003 (agua pretratada)	5,25
T-007 (alta presión)	5,15
D-009 (Desinfección)	5,15
B-004 (Pelton)	5,1
B-002 A-F (pozo bombeo)	5
B-007 A/B (pretratamiento)	5
B-008 A/B (pretratamiento)	5
B-009 A/B (pretratamiento)	5
B-010 A/B (pretratamiento)	5
B-011 A/B (pretratamiento)	5

B-014 (limpieza membranas)	5
B-015 (limpieza membranas)	5
B-012 A-D (neutralización)	5
B-013 A-D (neutralización)	5
T-021	4,85
T-022	4,85
D-015 A/B (neutralización)	4,75
D-016 A/B (neutralización)	4,75
D-008 (Decantador)	4,75
T-028	4,75
T-029	4,75
D-010 (pretratamiento)	4,45
D-011 (pretratamiento)	4,45
D-012 A/B (pretratamiento)	4,45
D-013 A/B (pretratamiento)	4,45
D-007 (lavado químico)	4,45
D-014 (CO2)	4,45
T-027	4,45
D-006 (limpieza membranas)	4,15
T-014	4,15
T-019	4,15
T-023	4,15
T-024	4,15
T-025	4,15
T-026	4,15
B-001 A-E (cántara captación)	4
D-002 (pozo de bombeo)	4
S-001	4
B-005 (limpieza filtro arena)	4
DF-001 A-F	4
LC-001 A-G	4
D-005 A/B (agua potable)	4
T-004	3,85
T-005	3,85
T-006	3,85
T-012	3,85
T-013	3,85
T-015	3,85
T-016	3,85
T-017	3,85
T-018	3,85
T-020	3,85
Torre de toma	3,7
Inmisario submarino	3,7

D-004 (agua permeada)	3,55
B-016 A/B (agua permeada)	3,55
B-017 A/B (lecho calcita)	3,55
T-001	3,55
T-003	3,55
T-008	3,55
T-009	3,55
T-010	3,55
T-011	3,55
B-006 A-D (decantador)	3,45
D-001 (cántara captación)	3,15
Tubería emisario	3,15
T-002	3,15
A-002 A/B	3
A-003 A/B	3
A-001	3
CF-001	2,85
T-001	2,85

Tabla 8. Clasificación de equipos por criticidad.

4.5. Técnicas de mantenimiento

Una vez clasificados los equipos por su criticidad, se debe tomar la decisión sobre las técnicas de mantenimiento que se deberán aplicar a cada uno de los equipos de la instalación. Para ello se establecerán tres niveles de criticidad en función del valor de cada equipo. Los niveles de criticidad establecidos son los siguientes:

> 5	Criticidad alta
[5-4]	Criticidad media
< 4	Criticidad baja

Tabla 9. Niveles de criticidad.

Los equipos con criticidad baja son los que presentan un menor riesgo para la instalación, por lo que un fallo en uno de ellos no supondrá grandes consecuencias. Por tanto, a estos equipos se les aplicará solamente mantenimiento correctivo.

Los equipos con criticidad media suponen un riesgo moderado para la instalación. Un fallo en alguno de ellos puede originar una parada parcial de la planta, provocar lesiones leves en las personas o daños leves en el medioambiente. El mantenimiento que se aplicará a estos equipos será correctivo, preventivo y predictivo.

Los equipos con criticidad alta son aquellos en los que una avería o un funcionamiento anómalo de un equipo pueden desencadenar graves consecuencias, como una parada total de la planta, poner en riesgo la vida de las personas, comprometer la seguridad de las instalaciones o provocar daños severos en el medioambiente. Por tanto, la mayoría de los recursos se destinarán al mantenimiento de estos equipos, siendo de aplicación los tres tipos de mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo.

Cabe destacar que aunque para los equipos de criticidad media y alta se apliquen los mismos tipos de mantenimiento, en los equipos de criticidad alta se emplearán una mayor cantidad de técnicas predictivas, como se detallará más adelante.

En la tabla 10 se muestra a modo de resumen el mantenimiento que se aplicará a cada subsistema de la planta.

Subsistema	Criticidad	Mantenimiento		
		Correctivo	Preventivo	Predictivo
Membranas	7,55	x	x	x
F-001 A-F	6,7	x	x	x
F-002 A-H	6,7	x	x	x
B-003 A-E (alta presión)	5,7	x	x	x
D-003 (agua pretratada)	5,25	x	x	x
T-007 (alta presión)	5,15	x	x	x
D-009 (Desinfección)	5,15	x	x	x
B-004 (Pelton)	5,1	x	x	x
B-002 A-F (pozo bombeo)	5	x	x	x
B-007 A/B (pretratamiento)	5	x	x	x
B-008 A/B (pretratamiento)	5	x	x	x
B-009 A/B (pretratamiento)	5	x	x	x
B-010 A/B (pretratamiento)	5	x	x	x
B-011 A/B (pretratamiento)	5	x	x	x
B-014 (limpieza membranas)	5	x	x	x
B-015 (limpieza membranas)	5	x	x	x
B-012 A-D (neutralización)	5	x	x	x
B-013 A-D (neutralización)	5	x	x	x
T-021	4,85	x	x	x
T-022	4,85	x	x	x
D-015 A/B (neutralización)	4,75	x	x	x
D-016 A/B (neutralización)	4,75	x	x	x
D-008 (Decantador)	4,75	x	x	x
T-028	4,75	x	x	x
T-029	4,75	x	x	x
D-010 (pretratamiento)	4,45	x	x	x
D-011 (pretratamiento)	4,45	x	x	x
D-012 A/B (pretratamiento)	4,45	x	x	x
D-013 A/B (pretratamiento)	4,45	x	x	x
D-007 (lavado químico)	4,45	x	x	x
D-014 (CO2)	4,45	x	x	x
T-027	4,45	x	x	x
D-006 (limpieza membranas)	4,15	x	x	x
T-014	4,15	x	x	x
T-019	4,15	x	x	x
T-023	4,15	x	x	x
T-024	4,15	x	x	x

T-025	4,15	x	x	x
T-026	4,15	x	x	x
B-001 A-E (cántara captación)	4	x	x	x
D-002 (pozo de bombeo)	4	x	x	x
S-001	4	x	x	x
B-005 (limpieza filtro arena)	4	x	x	x
DF-001 A-F	4	x	x	x
LC-001 A-G	4	x	x	x
D-005 A/B (agua potable)	4	x	x	x
T-004	3,85	x		
T-005	3,85	x		
T-006	3,85	x		
T-012	3,85	x		
T-013	3,85	x		
T-015	3,85	x		
T-016	3,85	x		
T-017	3,85	x		
T-018	3,85	x		
T-020	3,85	x		
Torre de toma	3,7	x		
Inmisario submarino	3,7	x		
D-004 (agua permeada)	3,55	x		
B-016 A/B (agua permeada)	3,55	x		
B-017 A/B (lecho calcita)	3,55	x		
T-001	3,55	x		
T-003	3,55	x		
T-008	3,55	x		
T-009	3,55	x		
T-010	3,55	x		
T-011	3,55	x		
B-006 A-D (decantador)	3,45	x		
D-001 (cántara captación)	3,15	x		
Tubería emisario	3,15	x		
T-002	3,15	x		
A-002 A/B	3	x		
A-003 A/B	3	x		
A-001	3	x		
CF-001	2,85	x		
T-001	2,85	x		

Tabla 10. Relación de equipos y mantenimiento correspondiente.



Capítulo 5

5. PLAN DE MANTENIMIENTO

5.1. Introducción

Una vez que se ha establecido el mantenimiento que se aplicará a cada equipo de la instalación, en base al análisis de criticidad realizado en el Capítulo 4, se procede a desarrollar el plan de mantenimiento. Un plan de mantenimiento está constituido por un conjunto de tareas de mantenimiento programado que se realizan sobre una serie de equipos de la instalación. En el presente Capítulo, se definirán las características principales de los tres tipos de mantenimiento, se describirán con detalle cada una de las técnicas predictivas, se definirán las gamas de mantenimiento preventivo y se profundizará en el proceso de gestión del mantenimiento correctivo.

5.2. Mantenimiento predictivo

Se trata de una técnica basada en el mantenimiento a través de inspecciones periódicas en las que se analiza el estado de los equipos mediante la medida de una serie de variables, las cuales nos aportan información acerca del estado de los equipos. Gracias a dicha información, se pueden prever los fallos antes de que se produzcan y actuar con la suficiente antelación para realizar las tareas de reparación o sustitución correspondientes. La medición de las variables se realiza con los equipos en funcionamiento, por lo que no es necesario detener la producción de la planta. Entre las variables que podemos medir se encuentran: temperatura, presión, caudal, cantidad de partículas en un lubricante, nivel de vibración u otras variables características del funcionamiento de cada equipo en particular.

Las ventajas más importantes que nos ofrece este tipo de mantenimiento son las siguientes:

- Permite agotar el período de vida útil de la pieza.
- Permite reducir el volumen del stock de repuestos, ya que los elementos necesarios pueden adquirirse con antelación.
- Permite detectar las causas que provocan las averías y no solo los síntomas.
- Facilita la recopilación de información histórica sobre cada equipo, de modo que nos ayuda a estudiar y analizar las causas que originan las averías.
- Mayor rapidez en la realización de las reparaciones, ya que nos permite detectar el punto exacto donde se ha producido la avería.
- Reduce la posibilidad de que se produzcan accidentes imprevistos, lo que conlleva una mayor seguridad en la planta.

Sin embargo, este tipo de mantenimiento también presenta algunos inconvenientes entre los que destacamos los siguientes:

- Se requiere de personal con alta cualificación en las diferentes técnicas de inspección y en la interpretación de los resultados obtenidos, ya que una mala interpretación de los mismos puede ocasionar averías y provocar accidentes que comprometan la seguridad de la planta.
- Se requiere una elevada inversión en lo que respecta a los equipos de medida.



- La falta de experiencia a la hora de interpretar las variables medidas puede generar dudas acerca de la inminencia del fallo, lo que puede provocar una avería mayor o un accidente si no se actúa a tiempo.
- Puede ocasionar desmotivación o aburrimiento en los técnicos que realizan el registro de las variables, ya que se trata de tareas muy repetitivas y monótonas.

Actualmente existe una gran variedad de técnicas predictivas para analizar el funcionamiento de los equipos. En nuestro caso, nos centraremos en los ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos son pruebas que se realizan a los materiales y que no modifican las propiedades físicas y químicas del material. Dentro de los ensayos no destructivos podemos encontrar diferentes técnicas. Para la inspección de los equipos de nuestra instalación emplearemos las siguientes técnicas:

- Análisis de aceites.
- Análisis de vibraciones.
- Análisis de parámetros funcionales.
- Inspección con ultrasonidos.
- Inspección con líquidos penetrantes.
- Inspección visual.
- Pinza amperimétrica y polímetro.
- Termografía infrarroja.

5.2.1. Análisis de aceites

La principal causa de fallo de los elementos mecánicos lubricados es la contaminación del aceite. Analizar la presencia de contaminantes en el aceite es indispensable para controlar de manera efectiva el desgaste que se produce en cualquier elemento mecánico lubricado. Por tanto, el análisis de aceites es una técnica predictiva que proporciona información valiosa para determinar cuándo se debe intervenir un equipo y ayuda a diagnosticar el fallo detectado.

Entre las ventajas que nos proporciona el análisis de aceites podemos destacar las siguientes:

- Permite extender la vida útil del aceite, que se cambiará solamente cuando sea necesario.
- Supone un ahorro en los costes de compra de aceite y en la mano de obra empleada en los cambios, debido a la extensión de la vida útil del aceite.
- Ayuda a reducir las reparaciones menores, ya que nos permite identificar con antelación los problemas antes de que produzcan una avería. Esto supone un ahorro en los costes de reparación, una ayuda a la hora de programar la reparación y una disminución de las tareas de mantenimiento programado.
- Proporciona una mayor información para verificar que las revisiones de mantenimiento rutinario se realizan correctamente.
- Reducción del impacto ambiental por aceites inservibles al reducir la frecuencia del cambio de aceite.

Para realizar el análisis de un aceite se puede emplear cualquiera de las técnicas que se citan a continuación:

- Espectrometalografía.



- Espectrometría de emisión.
- Análisis de espectrometría por infrarrojos.
- Ferrografía analítica.
- Análisis espectroquímico.
- Análisis para detección de agua.
- Análisis de viscosidad.
- Análisis de constante dieléctrica.

Aunque todas ellas son fiables, cada técnica presenta unas características diferentes. Algunas de ellas destacan porque alcanzan una mayor precisión en el análisis, mientras que otras se caracterizan por la inmediata obtención de los resultados. Por tanto, la elección de las técnicas a utilizar variará para cada caso en función de las necesidades de cada planta o instalación. Para nuestro caso se emplearan dos técnicas de análisis: el contaje de partículas y el análisis de constante dieléctrica.

5.2.1.1. Contaje de partículas

“El contaje de partículas consiste en la medida de la contaminación sólida en el seno de un lubricante mediante el contaje del número de partículas y clasificación del grado de contaminación en función del tamaño/concentración de partículas. Conocer el grado de limpieza de un fluido es fundamental a la hora de realizar un control de la contaminación presente en el sistema.”

A la hora de realizar el contaje de partículas se pueden utilizar una gran variedad de equipos de ensayo. Entre los más utilizados podemos destacar los siguientes: contadores ópticos automáticos por bloqueo de luz blanca, contadores ópticos automáticos por dispersión de luz, contadores por bloqueo de poro y contadores por análisis de imagen.

- Los contadores ópticos automáticos por bloqueo de luz blanca basan su funcionamiento en la proyección de un rayo de luz sobre la muestra de aceite. Las partículas que se hallen en la muestra bloquearán parte de la luz proyectada, produciendo una caída de voltaje en el fotodetector que es directamente proporcional al tamaño de la sombra. De esta manera cuanto mayor sea el tamaño de la sombra y la caída de tensión que provoca, mayor será el tamaño de la partícula.
- Los contadores ópticos automáticos por dispersión de luz suelen ser más exactos y precisos que los de luz blanca. El principio de funcionamiento de estos contadores es similar a los de luz blanca, con la excepción de que estos equipos proyectan un haz láser en lugar de luz blanca. Cuando el haz láser es proyectado sobre la muestra, las partículas presentes producirán una dispersión de la luz que origina una caída de voltaje en el fotodetector. Al igual que en el caso anterior, la caída de tensión es directamente proporcional al tamaño de la partícula. El principal inconveniente que presentan ambos contadores ópticos se da cuando la muestra de aceite contiene gotas de agua o burbujas de aire, ya que ambas pueden bloquear o dispersar la luz, lo que provoca medidas erróneas.
- Los contadores por bloqueo de poro suponen una alternativa a los contadores ópticos ya que la presencia de agua y aire no afecta a la medida de estos contadores. El funcionamiento de estos dispositivos consiste en hacer pasar la muestra de aceite por una membrana, la cual tiene un tamaño de poro definido. De esta manera se pueden medir tanto el aumento de presión diferencial como la caída de flujo a lo largo de la

membrana. Conocidos uno de estos dos parámetros se estima la distribución de tamaños de partículas por extrapolación mediante el empleo de un algoritmo.

- Los contadores por análisis de imagen realizan el conteo a través de una fotografía digital que se le realiza a la muestra de aceite. En dicha fotografía se puede medir el área de cada partícula a la vez que permite realizar un recuento del número de partículas. Una ventaja que proporciona este tipo de contador es que permite determinar la morfología de cada partícula, lo que resulta de gran utilidad para detectar partículas de aire o agua y excluirlas del conteo.

Una vez realizado el conteo, cada muestra se clasifica según la cantidad de contaminantes sólidos que contenga. Existen varias normas internacionales que se emplean para clasificar las muestras. A continuación se profundizará en la escala más utilizada, la ISO 4406:1999.

El grado de limpieza viene expresado por un código de tres cifras. La primera corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 4 micras por milímetro de fluido. La segunda corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 6 micras por milímetro de fluido. La tercera corresponde al número total de partículas de tamaño superior a 14 micras por milímetro de fluido. Las partículas menores de 6 micras indican la tendencia a formar depósitos de partículas. Por su parte, las partículas superiores a 14 micras indican la cantidad de partículas grandes, las cuales son las que afectan en mayor medida a la producción de averías importantes.

La principal ventaja de esta técnica es su elevada precisión en el análisis. Sin embargo, presenta varios inconvenientes: el tiempo de espera de los resultados, ya que el análisis se realiza en un laboratorio externo, y un elevado coste de análisis por muestra.

5.2.1.2. Análisis de la constante dieléctrica

La constante dieléctrica expresa la capacidad de un medio para transmitir corriente eléctrica. Representa el cociente entre la velocidad de un campo eléctrico en un medio y la velocidad del campo eléctrico en el vacío.

Cada material tiene una constante dieléctrica diferente. Los aceites lubricantes suelen tener una constante dieléctrica que varía entre un valor de 2,1 y 2,4 aproximadamente. Este valor puede variar ligeramente en función de ciertos parámetros como la densidad o viscosidad del aceite. La cantidad y los diferentes aditivos que contenga el aceite lubricante también influyen en el valor de la constante dieléctrica.

A diferencia del conteo de partículas esta técnica de análisis se realiza con equipos portátiles, lo que permite realizar la medición en la planta. Entre las principales ventajas que proporciona esta técnica destacan la obtención inmediata de resultados sobre los análisis y una reducción del coste de análisis por muestra. En la Figura 16 se muestra un analizador de aceite.



Figura 16. Analizador de aceite.

Antes de utilizar los instrumentos de medición es muy importante obtener el valor original de la constante dieléctrica del aceite nuevo para compararlo con los valores del aceite usado. Si existen variaciones importantes en la constante dieléctrica, estas pueden indicar problemas potenciales como los siguientes:

- Un incremento moderado indica la presencia de contaminantes tales como tierra, ácidos, hollín y productos de oxidación.
- Un incremento extremo indica la presencia de agua, anticongelante o partículas metálicas: se requiere acción inmediata.
- Un decremento moderado indica la presencia de combustible: se requiere acción inmediata.

5.2.2. Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones resulta de gran utilidad como técnica predictiva, ya que en cualquier máquina en funcionamiento existen vibraciones. Estas pueden ser consecuencia de desequilibrios, desalineación, rozamientos, flexión en los ejes o simplemente debidas a tolerancias inherentes en sus elementos constructivos. Cuando una maquina sufre una avería, esta suele manifestarse de varias formas, por ejemplo, con un incremento en la temperatura de funcionamiento o una disminución del rendimiento. Además de manifestarse de las formas mencionadas, toda máquina experimenta un aumento de las vibraciones cuando sufre una avería. Generalmente, las vibraciones se presentan como una consecuencia derivada de la avería de la máquina, aunque no siempre es así. En ocasiones, pueden ser la causa que origina la avería. Por ejemplo, si el nivel de vibración supera un valor crítico, o cuando el nivel de vibración se mantiene durante mucho tiempo en un valor excesivo, aunque no llegue a superar el límite.

De esta forma, se demuestra que el nivel de vibración que experimenta cualquier máquina nos aporta información sobre el estado de funcionamiento de la misma. Por tanto, el análisis de vibraciones se presenta como una herramienta de gran ayuda para detectar cambios en el estado de funcionamiento de los equipos y anticipar posibles averías. Existen

muchos tipos de fallos y averías que pueden detectarse mediante el análisis de vibraciones. Además, cada tipo de fallo provoca cambios diferentes en la vibración característica de la máquina, lo que permite determinar la causa del problema. Las principales causas de fallo en máquinas que se pueden detectar mediante esta técnica son las siguientes:

Desequilibrio: Se trata del fallo más común en máquinas. No necesariamente se produce por un desequilibrio mecánico real, puede producirse también por inestabilidades hidráulicas o aerodinámicas. De hecho, la cantidad de fallos como consecuencia de desequilibrios mecánicos reales es relativamente pequeña. Generalmente el desequilibrio manifiesta en la señal de vibración la componente de la velocidad de giro excitada y con una amplitud dominante. También se pueden excitar armónicos múltiples de la velocidad de giro. El número de armónicos y su amplitud están relacionados con el número de planos de desequilibrio y su relación de fases.

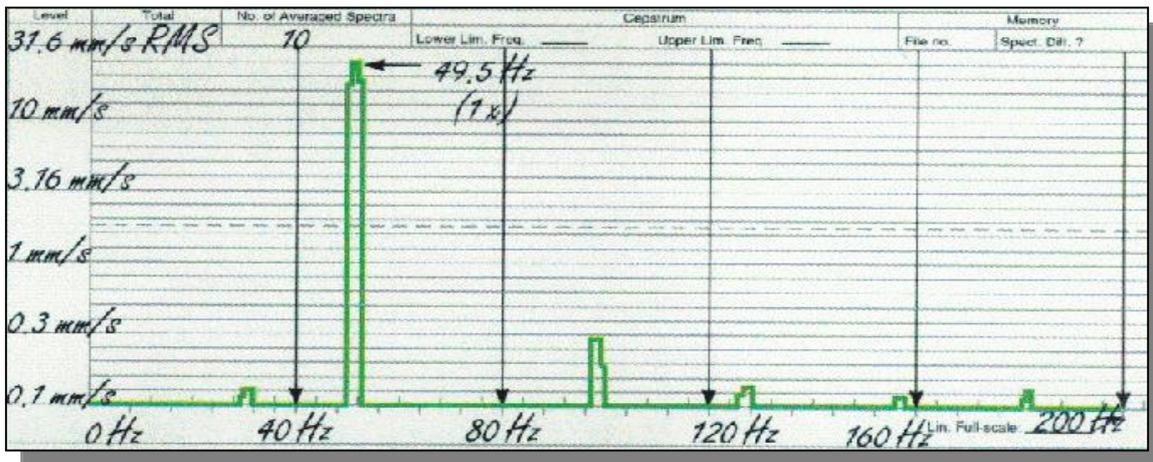


Figura 17. Espectro de frecuencias cuando existe un desequilibrio.

Desalineación: se produce como consecuencia de la falta de coincidencia espacial de los ejes geométricos correspondientes a dos árboles de transmisión acoplados. La desalineación también puede existir entre dos puntos cualesquiera de la máquina, no necesariamente entre arboles de transmisión o ejes. Existen dos tipos principales de desalineación:

- Desalineación paralela: es la que se produce cuando los ejes son paralelos, pero no están contenidos en el mismo plano.

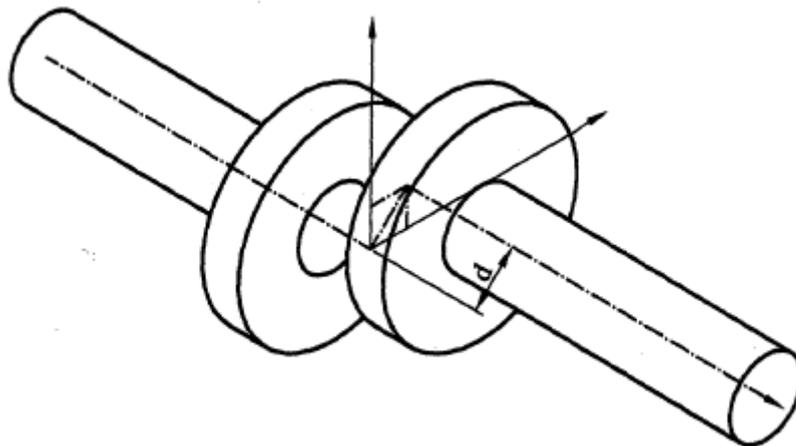


Figura 18. Desalineación paralela.

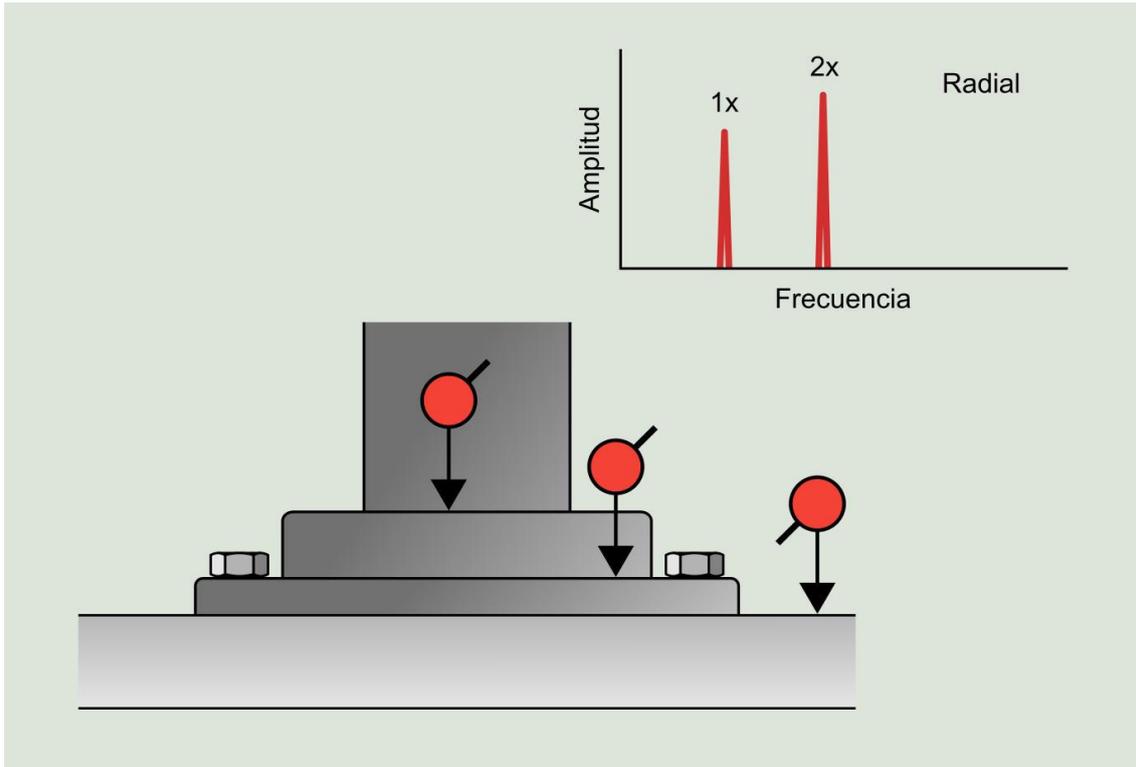


Figura 21. Holgura mecánica.

Eje doblado: Un fallo muy común en los equipos mecánicos son los producidos por ejes doblados. Este tipo de fallo genera una alta vibración axial, que domina generalmente los armónicos 1X y 2X del espectro de vibración. Si el eje está doblado cerca de su centro la vibración dominante se producirá en el primer armónico (1X). En cambio, si el eje está doblado cerca del acoplamiento la vibración dominante se producirá en el segundo armónico (2X)

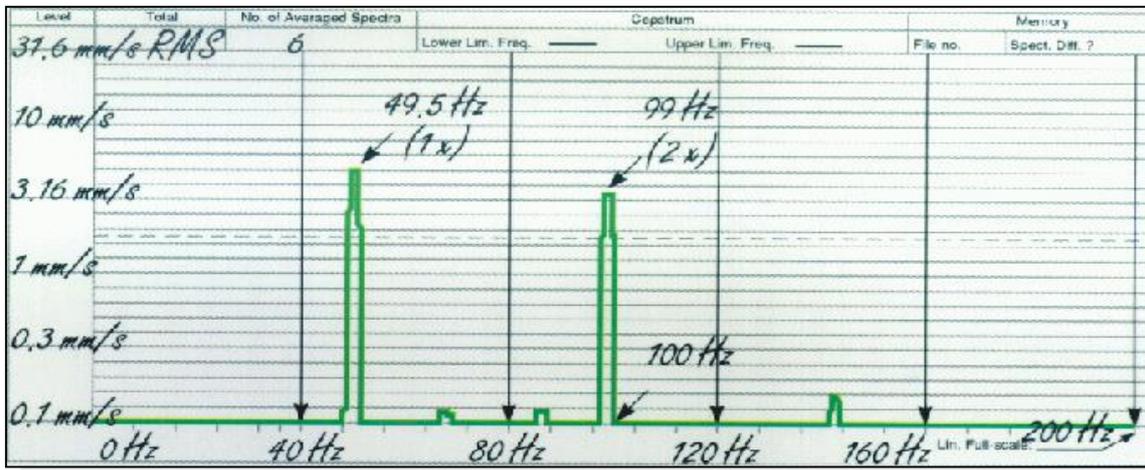


Figura 22. Espectro de frecuencias cuando existe un eje doblado.

Spike Energy

Dentro del análisis de vibraciones la medida de la “energía de picos” o Spike Energy es una técnica empleada para la detección de fallos en rodamientos. Se trata de una técnica de gran precisión que se caracteriza por ser la más sensible a este tipo de fallos y, por tanto, la que nos avisa con más tiempo de la presencia de defectos en el rodamiento.

El término Spike Energy tiene su origen en las vibraciones de aspecto puntiagudo que genera un rodamiento cuando está defectuoso. Los impactos que producen los elementos rodantes de un rodamiento cuando circulan por las pistas de rodadura se pueden transmitir de dos maneras: como una secuencia de pulsos con una forma puntiaguda y de corta duración, o bien excitando los modos naturales de vibración del rodamiento. En cualquier de los dos casos se trata de vibraciones de alta frecuencia y pequeña amplitud.

Si los impactos producidos son leves y de secuencia lenta, el valor medido de Spike Energy será pequeño. Por tanto, los defectos puntuales en la pista o en cualquier elemento que no provoquen un aumento de energía considerable serán difíciles de detectar. Por el contrario, los impactos que produzcan un valor alto de Spike Energy, correspondientes a defectos que afecten en gran medida a la pista o a los elementos rodantes, se podrán detectar con mayor facilidad. Suele ser el caso de defectos generalizados, como falta de lubricación, fatiga superficial, corrosión, oxidación, etc.

La medición de la vibración se realizará en magnitud de aceleración. Su unidad de medida será el gSE, un término adimensional referido al valor de la aceleración de la gravedad, seguido de la medida de Spike Energy dentro de un rango de frecuencias determinado. El procedimiento de medida consistirá en aplicar un filtrado de altas frecuencias a la señal de aceleración. Como consecuencia del filtrado, la medida de Spike Energy es independiente del resto de vibraciones producidas por la máquina, principalmente de las de frecuencias bajas.

El principal inconveniente que presenta esta técnica de análisis de vibraciones es que las lecturas dependen de factores particulares de cada máquina, como la velocidad de giro o las desviaciones en el punto de medición. Por tanto, lo que resulta más eficaz es analizar la evolución de los resultados obtenidos para establecer tendencias. Las tendencias ascendentes suelen indicar la presencia de un defecto en el rodamiento, mientras que una tendencia descendente brusca suele anticipar el fallo del rodamiento.



Figura 23. Medición de Spike Energy.



5.2.3. Análisis de parámetros funcionales

Se definen como parámetros funcionales a aquellas magnitudes físicas susceptibles de sufrir cambios en su valor cuando varía el estado de funcionamiento de una máquina. De esta manera, para poder considerar una magnitud como parámetro funcional deben cumplirse las siguientes condiciones:

- En primer lugar, la magnitud física debe depender de algún modo del estado de funcionamiento de la máquina, ya que si esto no ocurre la magnitud no tendría ningún valor como herramienta predictiva.
- En segundo lugar, las variaciones que sufra la magnitud como consecuencia de un funcionamiento anómalo de la máquina, deben seguir un comportamiento repetitivo o regular, de modo que puedan obtenerse conclusiones que ayuden a diagnosticar la causa de la anomalía.

De entre todos los parámetros funcionales que cumplan las condiciones anteriores para cada tipo de máquina, habrá algunos que serán más sensibles que otros a los cambios en el estado de funcionamiento de la máquina. Por ello es necesario realizar una selección de los parámetros más sensibles para cada caso en particular.

La selección de los parámetros funcionales a analizar depende de factores como: el tipo de máquina, las características del proceso productivo, el equipo en el cual está integrada la máquina, etc.

Las ventajas principales que nos aporta el análisis de parámetros funcionales son las siguientes:

- Permite detectar fallos rápidamente, antes de que provoquen una avería mayor.
- Permite detectar anomalías en el funcionamiento de equipos a los que es físicamente imposible acceder, como el caso de las bombas sumergibles.
- Permite detectar anomalías en el funcionamiento de equipos que serían imposibles de detectar con otras técnicas predictivas.
- Mejora el seguimiento y control de los equipos al monitorizar los parámetros de funcionamiento.

5.2.4. Inspección con ultrasonidos

La inspección por ultrasonidos es una técnica capaz de detectar los sonidos que se encuentran en frecuencias superiores a los 20 kHz, es decir, fuera de la capacidad auditiva del ser humano. Gracias a los equipos de ultrasonidos podemos llegar a detectar sonidos que se encuentran en el rango de entre 20 kHz y 100 kHz. Esto depende en gran medida del tipo de equipo que se utilice para la inspección y del tipo de sensor que lleve incorporado cada equipo.

Los beneficios más destacados que nos reporta el uso de esta técnica son los siguientes:

- Permite detectar fallos y averías con antelación.
- Supone un ahorro importante en los costes de mantenimiento.
- Supone un ahorro importante en los equipos que operan con vapor y aire comprimido.
- Ayuda a mejorar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos.
- Mejora la seguridad de la planta al reducir la posibilidad de que se produzcan averías y accidentes.

Aunque el rango de aplicaciones de la inspección por ultrasonidos es muy amplio, para esta planta solamente se utilizará para las siguientes aplicaciones:

- Detección de fugas en sistemas de presión, tuberías y válvulas.
- Detección de fenómenos eléctricos.
- Inspección de rodamientos.
- Medición de espesores en tuberías.

5.2.4.1. Detección de fugas

La detección de fugas es una de las aplicaciones más extendidas de esta técnica. El principio de funcionamiento de los equipos de inspección por ultrasonidos es el siguiente. Cuando un fluido o gas se expande al pasar de un sistema de alta presión a uno de baja presión, se produce un flujo turbulento. Este flujo produce una gran cantidad de ultrasonidos, que son detectados por los equipos de inspección. Además, los ultrasonidos disminuyen al alejarse de la fuente de emisión, por lo que es posible detectar el punto exacto donde se está produciendo la fuga.

Del mismo modo, es posible detectar las fugas internas que puedan producirse en una válvula, por ejemplo, debido al mal cierre de la misma. Este tipo de fugas serían imposibles de detectar por otros medios. La revisión periódica de las válvulas es fundamental, ya que una fuga importante puede ocasionar accidentes que comprometan la seguridad de los operarios y de la instalación.



Figura 24. Detección de fugas mediante ultrasonidos.

5.2.4.2. Detección de fenómenos eléctricos

Esta técnica se emplea principalmente para la detección de efecto corona y arcos eléctricos en los diferentes sistemas eléctricos presentes en la instalación.

El efecto corona se produce por la ionización del fluido que rodea a un conductor cargado. Ocurre espontáneamente en las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso. Un arco eléctrico es una liberación repentina de energía eléctrica a través del aire, cuando existe una ruptura en los conductores eléctricos en presencia de alto voltaje.

La detección de estos fenómenos es posible gracias a las distorsiones que se crean en el aire, las cuales generan numerosos ultrasonidos, como consecuencia de la electricidad que se escapa de los sistemas de alta tensión. En algunos casos este fenómeno produce un zumbido o crujido que puede ser oído por el ser humano sin la necesidad de ultrasonidos.

Durante las tareas periódicas de revisión se inspeccionarán los transformadores y aisladores de las subestaciones eléctricas. De los sistemas de baja tensión se inspeccionarán las barras de buses y las cajas de conexión. En caso de que la intensidad de la señal sea baja, se pueden emplear discos parabólicos o módulos de largo alcance, los cuales ayudan a identificar con mayor precisión la fuente de emisión de ultrasonidos.



Figura 25. Medición de fenómenos eléctricos mediante ultrasonidos.

5.2.4.3. Inspección de rodamientos

La inspección por ultrasonidos es una técnica muy eficaz para detectar fallos en rodamientos. Gracias a los ultrasonidos se pueden detectar los fallos antes que con otras técnicas, ya que los ultrasonidos se generan antes que los incrementos de temperatura o las vibraciones, lo que permite una detección anticipada del fallo.

Normalmente un rodamiento empieza a fallar cuando su nivel de ultrasonidos aumenta de 10 dB a 20 dB. El rango de frecuencias para detectar fallos en rodamientos es de 20 a 30 kHz, siendo 25 kHz la frecuencia óptima. Los ultrasonidos se generan cuando un elemento rodante pasa por una zona dañada de la pista de rodadura, como consecuencia del impacto que se produce. La repetición del impacto a lo largo del tiempo generará un ultrasonido característico que incrementará la amplitud de alguna de las frecuencias monitorizadas, alertando de esta manera de la existencia de un fallo. Entre los fallos que se pueden detectar destacan los siguientes:

- Inicio de fallos por fatiga.
- Daños en los elementos rodantes o en las pistas de rodadura.
- Falta de lubricación.



Figura 26. Inspección de rodamientos mediante ultrasonidos.

5.2.4.4. Medición de espesores en tuberías.

La inspección por ultrasonidos se emplea también para medir los espesores de un material. Esta técnica se empleará para realizar la medición del espesor de las tuberías de nuestra instalación. Se trata de una técnica muy versátil, rápida y que se realiza con equipos portátiles. La principal ventaja que presenta es que con tener acceso a una sola superficie de la pieza se puede realizar la medición, por lo que no es necesario cortar o seccionar la pieza. El uso de esta técnica no se limita a la medición de espesores en tuberías, también se puede emplear en tanques, recipientes a presión y en otros materiales que estén sujetos a desgaste y corrosión. Puede utilizarse en materiales metálicos, plásticos, materiales compuestos, cerámica y vidrio. Sin embargo, su uso no es adecuado para materiales con mala transmisión de las ondas de alta frecuencia, como la madera, el hormigón y los materiales porosos.



Figura 27. Medidor de espesores.

El principio de funcionamiento de estos dispositivos se basa en la determinación del denominado tiempo de vuelo, esto es, el tiempo que tarda un impulso ultrasónico, generado por un transductor, en atravesar la pieza y regresar al dispositivo emisor. El transductor está

compuesto por un elemento piezoeléctrico que genera las ondas ultrasónicas cuando es excitado mediante un impulso eléctrico. Las ondas ultrasónicas atraviesan el material hasta que encuentran la pared posterior, donde se produce su reflexión y regresan al transductor. De esta manera, en función del tiempo de vuelo se determina el espesor de la pieza.

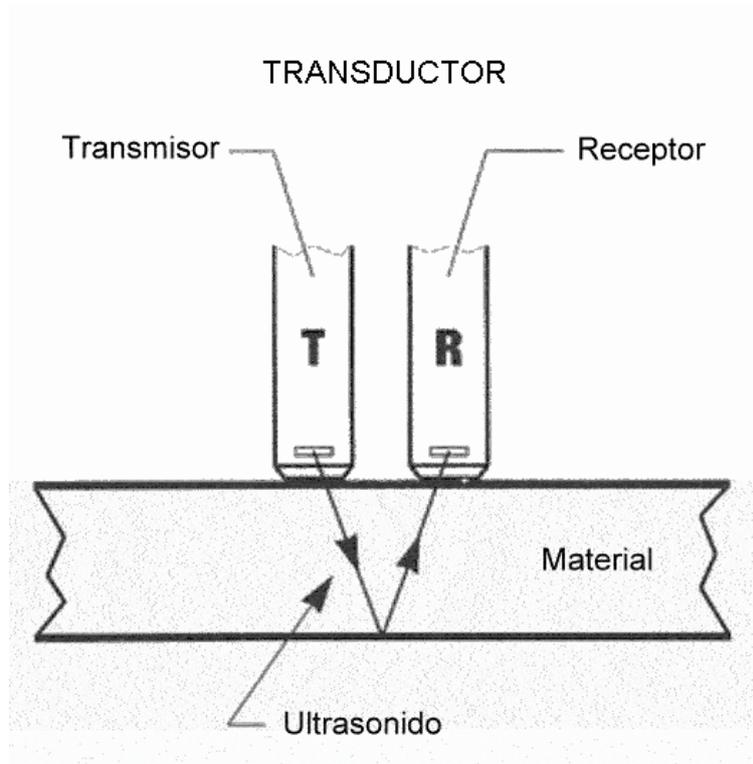


Figura 28. Funcionamiento de un medidor de espesores.

5.2.5. Inspección con líquidos penetrantes

La inspección con líquidos penetrantes permite la detección de discontinuidades superficiales en materiales no porosos. Esta técnica está limitada solamente a la detección de discontinuidades abiertas a la superficie, no siendo capaz de detectar defectos subsuperficiales. Esta técnica se usa principalmente sobre metales no ferromagnéticos, ya que para inspeccionar metales ferromagnéticos se emplean otras técnicas más ventajosas, como los ensayos por partículas magnéticas.



Figura 29. Aplicación de líquidos penetrantes.

El procedimiento de aplicación de esta técnica se basa en la realización secuencial de las siguientes operaciones:

1. Preparación y limpieza de la superficie a inspeccionar. Como paso previo antes de aplicar el líquido penetrante, es necesario limpiar correctamente la superficie del objeto a inspeccionar, para eliminar cualquier elemento que pueda interferir en el ensayo. Restos de aceite, óxido, agua u otros elementos pueden dificultar y falsear los resultados del ensayo.
2. Aplicación del líquido penetrante. Tras la limpieza de la superficie se aplica el líquido penetrante. La aplicación se puede realizar de diversas maneras: por inmersión, por pulverización de aerosoles, con pistola de aire comprimido y con brocha. La elección de la técnica de aplicación dependerá del tamaño de la pieza y de la cantidad de piezas a ensayar.
3. Eliminación del exceso de líquido penetrante. Tras la aplicación del líquido penetrante y transcurrido el tiempo de penetración necesario, se procede a eliminar el exceso de líquido presente en la superficie, con cuidado de no extraer el líquido que haya penetrado en las discontinuidades. El tipo de líquido penetrante utilizado influirá en la manera de realizar el proceso de eliminación.
4. Aplicación del revelador. Una vez eliminado el exceso de penetrante se aplica el revelador. Mediante esta operación los defectos se hacen visibles para su evaluación. La función del revelador consiste en extraer el líquido de las discontinuidades y en aumentar la visibilidad de los defectos, debido al contraste entre el color del líquido y del revelador. En función del acabado superficial, de la cantidad de piezas y del tamaño de las mismas se pueden emplear distintos tipos de reveladores.
5. Interpretación y evaluación de las indicaciones. Para evaluar correctamente los resultados obtenidos la experiencia y conocimientos del operador serán claves, ya que pueden aparecer falsas indicaciones, normalmente como consecuencia de una mala ejecución a la hora de eliminar el exceso de penetrante. Para esta operación pueden ser necesarios equipos de luz negra si se utilizan penetrantes fluorescentes sensibles a

la luz ultravioleta. Si por el contrario se emplean penetrantes que son visibles a la luz natural, solo será necesario disponer de una buena iluminación.

6. Limpieza final. La última operación consistirá en realizar una limpieza de toda la superficie ensayada para devolver la pieza a su estado original.

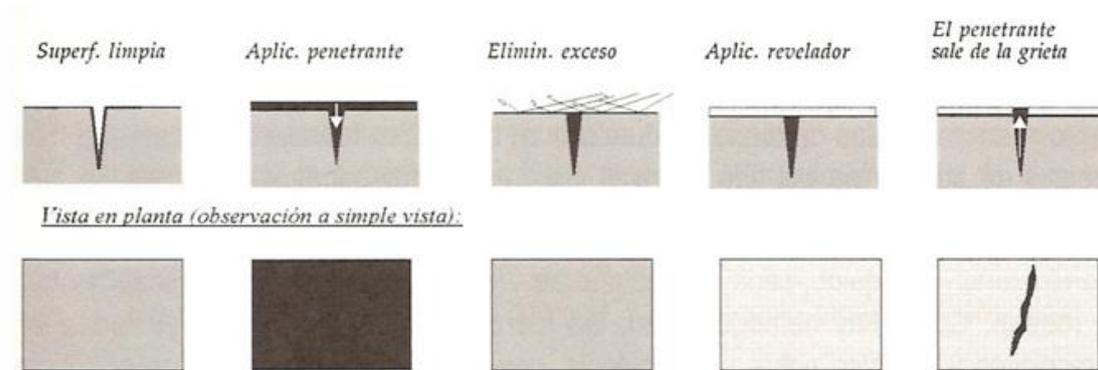


Figura 30. Fundamento del ensayo por líquidos penetrantes.

El empleo de la técnica de inspección con líquidos penetrantes nos reporta las siguientes ventajas:

- Permite ensayar toda la superficie de la pieza.
- Se puede aplicar a piezas de gran tamaño y de geometría compleja.
- Es un ensayo económico, ya que no requiere equipos complejos.
- Puede realizarse en taller o en obra, de forma automática o manual.
- Puede aplicarse a una gran variedad de materiales.

Sin embargo, el uso de esta técnica también presenta una serie de inconvenientes, entre los que destacamos los siguientes:

- No permite detectar defectos subsuperficiales.
- No es aplicable a materiales porosos.
- Es necesario que las superficies a ensayar estén completamente limpias, sin pinturas ni recubrimientos.

5.2.6. Inspección visual

La inspección visual es la técnica predictiva más básica y consiste en la observación de los diferentes equipos, con el objetivo de detectar anomalías a simple vista. Se utiliza en todos aquellos equipos y máquinas que podemos observar directamente, sin necesidad de desmontar ningún elemento. Cada vez los equipos se diseñan con menos elementos inaccesibles, lo que facilita el uso de esta técnica y permite detectar fallos en zonas que antes no podían ser observadas directamente.

Entre las ventajas más importantes que presenta la inspección visual podemos destacar las siguientes:

- Es la más sencilla.
- Es la más económica.
- Es la más rápida.
- No requiere equipamiento de inspección.

Las anomalías que podemos detectar con facilidad mediante esta técnica son las siguientes:

- Cambios de color.
- Fugas de agua, aceite y aire.
- Aparición de grietas y fisuras.
- Ruidos anómalos.
- Fallos en elementos de sujeción.
- Signos de corrosión.
- Desgaste de elementos.



Figura 31. Fuga de agua detectable a simple vista.

5.2.7. Pinza amperimétrica

La pinza amperimétrica es tipo de amperímetro usado para medir la corriente eléctrica. Basa su funcionamiento en la medición del campo magnético que genera la corriente eléctrica cuando circula por un conductor para determinar la intensidad que circula por el mismo.

Para su utilización solamente hay que abrazar el conductor cuya corriente queremos medir con la pinza, donde se encuentra el sensor para realizar la medición. La principal ventaja de este instrumento es la seguridad que proporciona a los operarios, ya que evita abrir el circuito para realizar la medida.



Figura 32. Pinza amperimétrica.

5.2.8. Polímetro

El polímetro es un instrumento portátil que permite la medición de magnitudes eléctricas activas (corrientes eléctricas y potenciales) y pasivas (resistencias y capacidades).



Figura 33. Polímetro.

5.2.9. Termografía infrarroja

La termografía es una técnica que permite conocer la temperatura de un objeto mediante el uso de una cámara termográfica, la cual registra la intensidad de la radiación infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible. De esta manera somos capaces de visualizar la distribución superficial de temperaturas del objeto a analizar para así determinar si existen anomalías o fallos en los diferentes elementos que componen la instalación.



Figura 34. Cámara termográfica.

Entre las ventajas más importantes del uso de la termografía infrarroja podemos destacar:

- La inspección se realiza durante la operación normal de los equipos, por lo que no afecta a la producción de la planta.
- Se realiza a distancia y sin contacto directo.
- Permite visualizar la temperatura de superficies completas.
- Permite detectar fallos rápidamente, ya que los resultados son inmediatos.

Son muchas las posibles aplicaciones de la termografía infrarroja como técnica predictiva, sin embargo, para nuestra planta se empleará para las siguientes aplicaciones:

5.2.9.1. Sistemas eléctricos

La termografía es una técnica muy empleada para la inspección de diferentes sistemas eléctricos, tanto los que forman parte de instalaciones de alta tensión como componentes de instalaciones de baja tensión.

En las instalaciones de alta tensión el calor que genera la corriente eléctrica cuando pasa a través de un elemento resistivo es un factor fundamental que hay controlar. Cuanto mayor sea el elemento resistivo, mayor será el calor generado por la corriente eléctrica. De esta manera, si se produce un aumento en la resistencia de las conexiones eléctricas debido a factores como la corrosión, se producirá un incremento de temperatura que puede ocasionar el fallo de los componentes, provocando cortes de tensión inesperados. Por ello, si no se revisan regularmente este tipo de instalaciones el calor puede acumularse hasta el extremo de fundir conexiones y provocar averías e incendios.

Entre los fallos que podemos detectar en instalaciones de alta tensión destacamos los siguientes:

- Oxidación de interruptores de alta tensión.
- Conexiones recalentadas.
- Conexiones mal aseguradas.

- Defectos de aislamiento.



Figura 35. Imagen real de una conexión a temperatura excesiva.

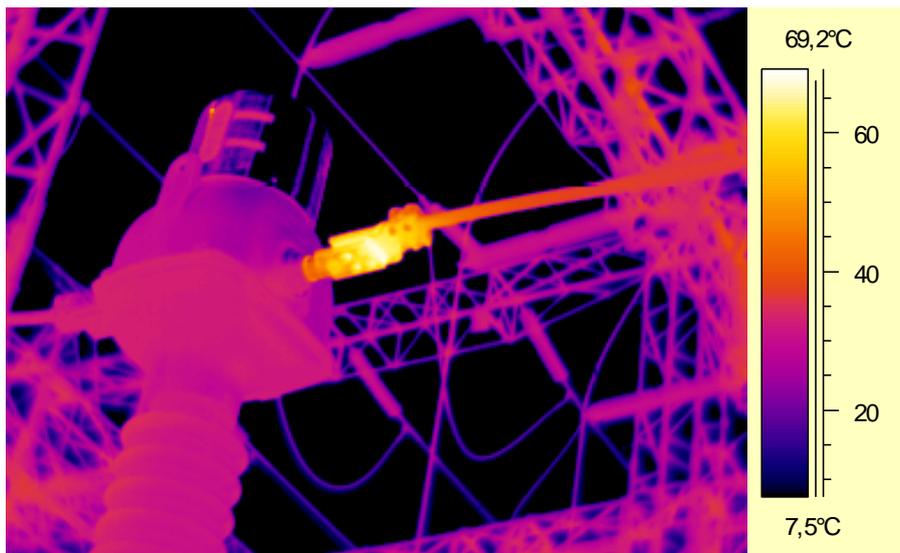


Figura 36. Imagen termográfica de una conexión a temperatura excesiva.

En las instalaciones de baja tensión esta técnica se emplea principalmente para la inspección de cuadros eléctricos y centros de control de motores. Al igual que en las instalaciones de alta tensión, el calor puede llegar a fundir conexiones y producir averías e incendios, por lo que no hay que descuidar la revisión de estos componentes. Además, los sistemas eléctricos pueden sufrir corrosión, desequilibrios de carga y aumento en las impedancias de corriente. Sin embargo, las inspecciones con cámaras termográficas nos permiten identificar rápidamente estos fallos y detectarlos con antelación.

Entre los fallos que podemos detectar en instalaciones de baja tensión destacamos los siguientes:

- Conexiones de alta resistencia.

- Conexiones corroídas.
- Daños internos en los fusibles.
- Fallos internos en los disyuntores.
- Malas conexiones y daños internos.



Figura 37. Imagen real de un cuadro eléctrico con una conexión a temperatura excesiva.

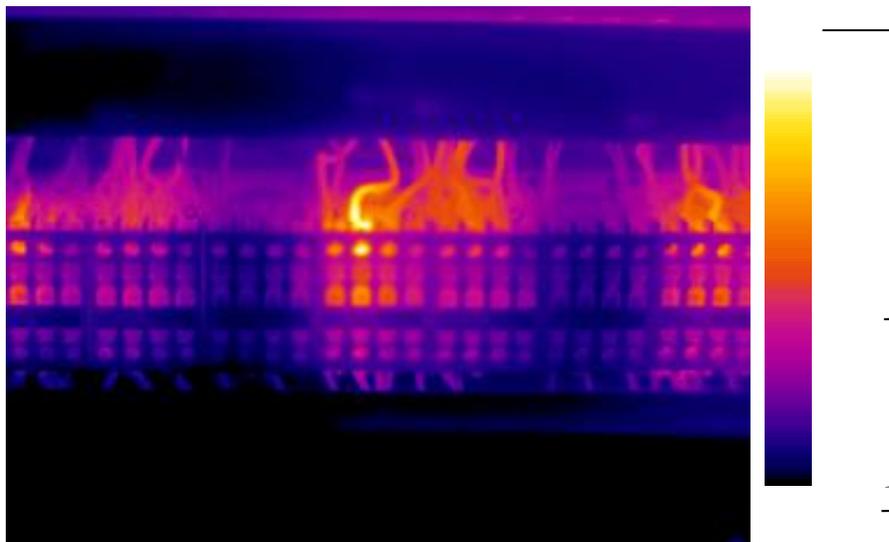


Figura 38. Imagen termográfica de un cuadro eléctrico con una conexión a temperatura excesiva.

5.2.9.2. Sistemas mecánicos

Los componentes mecánicos suelen disipar más calor como consecuencia del desgaste y de la pérdida de eficiencia. Por ello, la termografía es una herramienta de gran ayuda para la detección de fallos en este tipo de componentes, ya que un aumento de temperatura suele ser indicativo de una avería a corto plazo. Realizando una comparación entre los valores de temperatura obtenidos por la cámara termográfica y el perfil de temperatura en condiciones de funcionamiento normales, somos capaces de detectar una gran cantidad de fallos antes de que lleguen a producirse. Los sistemas que podemos supervisar con esta técnica son transmisiones, cojinetes, rodamientos, bombas, compresores, correas, etc.



Figura 39. Imagen real de un motor eléctrico con rodamientos sobrecalentados.

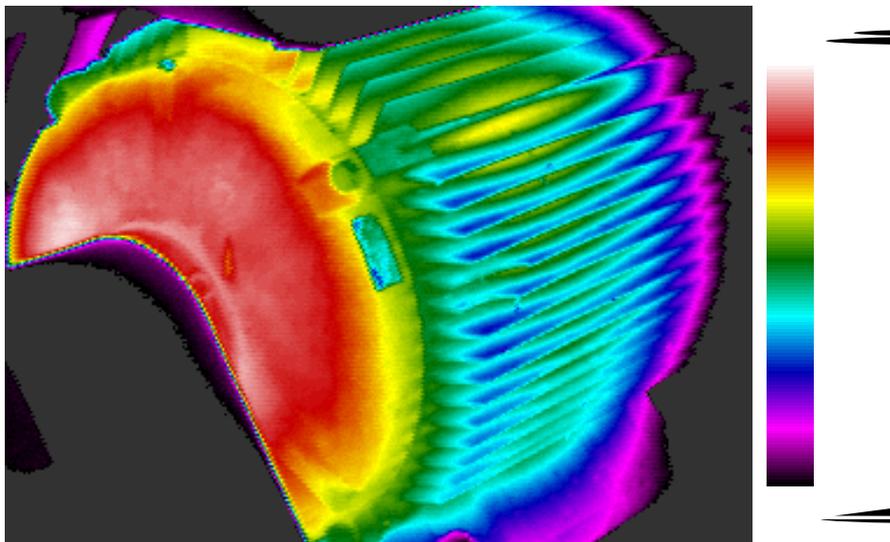


Figura 40. Imagen termográfica de un motor eléctrico con rodamientos sobrecalentados.

En lo que respecta a los motores hay fallos que pueden producirse y serían imposibles de detectar sin el uso de la termografía, como los signos de desgaste en el contacto de las escobillas y los cortocircuitos en los armazones.

5.2.9.3. Tuberías

La termografía es capaz de ofrecernos información muy valiosa acerca del estado del aislamiento de tuberías y conductos. Gracias a ella se pueden detectar fácilmente pérdidas de calor por un aislamiento defectuoso, lo que permite actuar de manera rápida y eficaz para realizar la reparación correspondiente. Además, resulta de gran utilidad para visualizar posibles obstrucciones o sedimentaciones en tuberías. También se emplea para la detección de fugas en las válvulas de proceso, incluso es capaz de determinar si la válvula se encuentra abierta o cerrada.

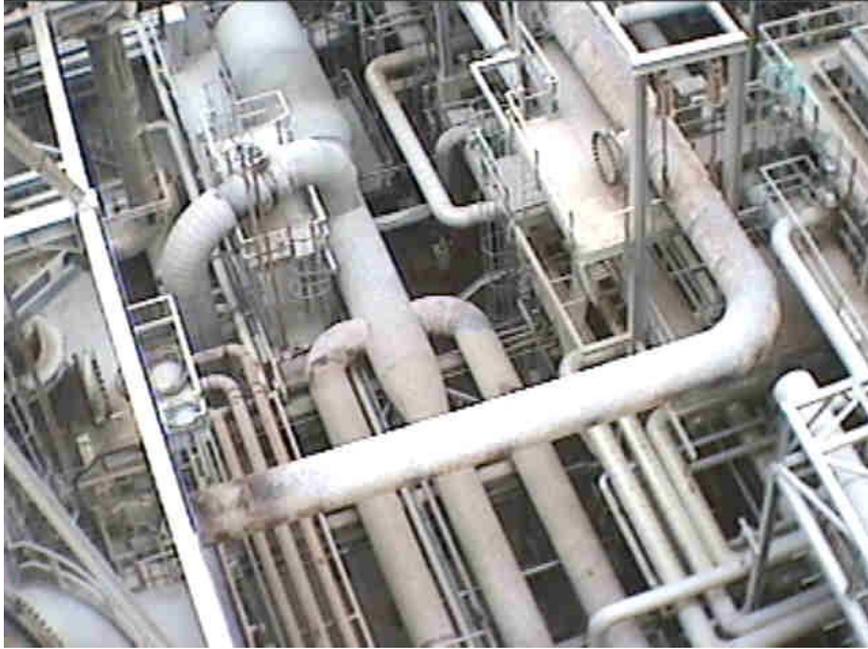


Figura 41. Imagen real de un aislamiento refractario en mal estado.



Figura 42. Imagen termográfica de un aislamiento refractario en mal estado.

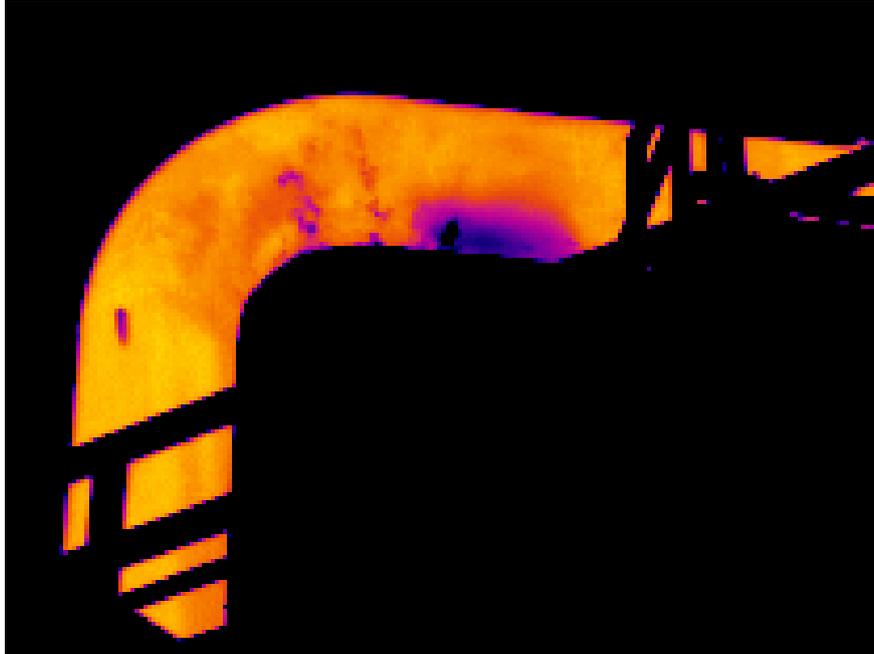


Figura 43. Imagen termográfica de una tubería con sedimentación.

5.2.9.4. Detección de nivel de depósitos

Una de las aplicaciones de la termografía es la visualización de nivel de líquido presente en un tanque o depósito de almacenamiento, gracias a los efectos de emisividad o a la diferencia de temperatura.

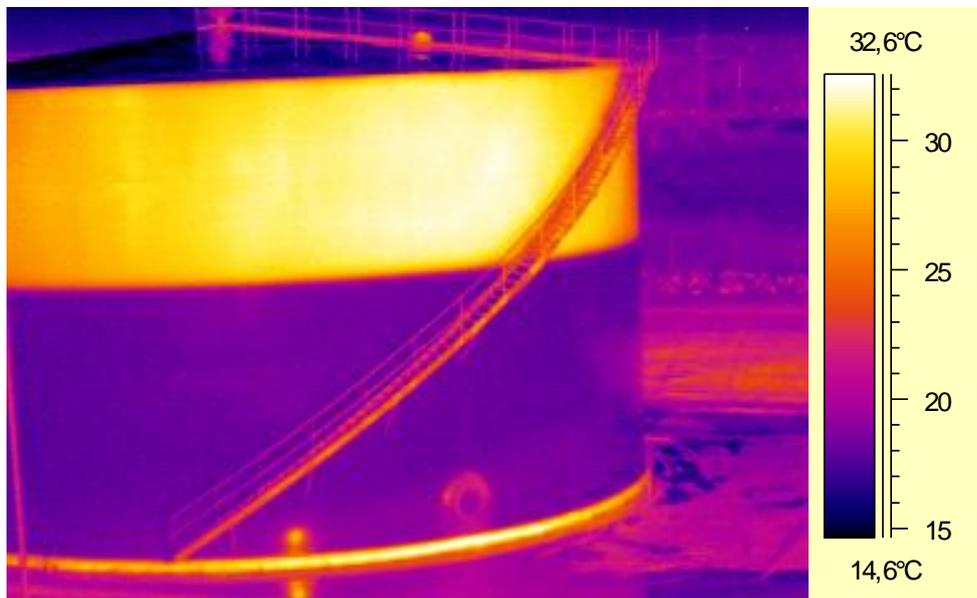


Figura 44. Imagen termográfica del nivel de líquido de un depósito.

5.2.10. Relación de equipos y técnicas predictivas

A continuación, en la Tabla 11, se muestra una relación con los equipos que requerirán de mantenimiento predictivo y las técnicas a emplear para cada uno de ellos.

Sistema	Subsistema	Análisis aceites	Análisis vibraciones	Ultrasonidos	Liq. penetrantes	Inspección visual	Pinza y polímetro	Param. Funcionales	Termografía
Ósmosis inversa	Membranas					X		X	
Filtros arena-antracita	F-001 A-F					X		X	
Filtros de cartucho	F-002 A-H					X		X	
Agua pretratada	B-003 A-E	X	X*	X		X	X	X	X
Agua pretratada	D-003			X	X	X			X
Sistema de tuberías	T-007			X	X	X		X	X
Desinfección	D-009			X	X	X			X
Turbina Pelton	B-004	X	X*	X		X	X		X
Pozo de bombeo	B-002 A-F						X	X	
Desinfección	B-007 A/B	X	X*	X		X	X	X	X
Acidificación	B-008 A/B	X	X*	X		X	X	X	X
Coagulación	B-009 A/B	X	X*	X		X	X	X	X
Decloración	B-010 A/B	X	X*	X		X	X	X	X
Antiincrustante	B-011 A/B	X	X*	X		X	X	X	X
Limpieza membranas	B-014	X	X*	X		X	X	X	X
Limpieza membranas	B-015	X	X*	X		X	X	X	X
Neutralización	B-012 A-D	X	X*	X		X	X	X	X
Neutralización	B-013 A-D	X	X*	X		X	X	X	X
Sistema de tuberías	T-021			X	X	X		X	X
Sistema de tuberías	T-022			X	X	X		X	X
Neutralización	D-015 A/B			X	X	X			X
Neutralización	D-016 A/B			X	X	X			X
Decantador	D-008			X	X	X			X
Sistema de tuberías	T-028			X	X	X		X	X
Sistema de tuberías	T-029			X	X	X		X	X
Acidificación	D-010			X	X	X			X

Coagulación	D-011			x	x	x			x
Decloración	D-012 A/B			x	x	x			x
Antiincrustante	D-013 A/B			x	x	x			x
Limpieza membranas	D-007			x	x	x			x
Dosificación de CO2	D-014			x	x	x			x
Sistema de tuberías	T-027			x	x	x		x	x
Limpieza membranas	D-006			x	x	x			x
Sistema de tuberías	T-014			x	x	x		x	x
Sistema de tuberías	T-019			x	x	x		x	x
Sistema de tuberías	T-023			x	x	x		x	x
Sistema de tuberías	T-024			x	x	x		x	x
Sistema de tuberías	T-025			x	x	x		x	x
Sistema de tuberías	T-026			x	x	x		x	x
Cántara captación	B-001 A-E						x	x	
Pozo de bombeo	D-002			x	x	x			x
Bomba soplante	S-001	x	x*	x		x	x	x	x
Limpieza filtros arena	B-005	x	x*	x		x	x	x	x
Dosificación de CO2	DF-001 A-F			x		x			
Lechos de calcita	LC-001 A-G			x		x			
Agua potable	D-005 A/B			x	x	x			x

Tabla 11. Relación de equipos con sus correspondientes técnicas predictivas.

x*: Incluye análisis de vibraciones mediante Spike Energy.

5.3. Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento, como su nombre indica, se basa en prevenir el fallo antes de que se produzca. Para ello se establecen una serie de tareas periódicas, que serán específicas para cada equipo de la instalación. Estas tareas pueden consistir en la sustitución de componentes, inspecciones de seguridad, revisión de equipos, etc. Algunas de estas tareas, como las sustituciones de piezas, se realizarán según el intervalo de tiempo establecido, independientemente del estado en que se encuentren. Los intervalos de tiempo para cada tarea se establecen de acuerdo a la experiencia y a los datos históricos de averías que se dispongan. Por tanto, la eficacia de este tipo de mantenimiento se basará en la precisión con la que se definan los intervalos de cada tarea.

Las ventajas más destacadas que nos reporta el mantenimiento preventivo son las siguientes:

- La programación del mantenimiento es más sencilla que en el mantenimiento correctivo, ya que se producen menos averías imprevistas.
- Permite reducir el volumen del stock de repuestos, ya que los elementos necesarios pueden adquirirse con antelación.
- Es recomendable para componentes en los que su deterioro es claramente dependiente del número de ciclos o de las horas de trabajo.

Sin embargo, este tipo de mantenimiento también presenta una serie de desventajas entre las que podemos destacar las siguientes:

- Desde el punto de vista económico, puede no ser rentable si no se definen de manera precisa los periodos de sustitución de los elementos, ya que no se agotaría la vida útil de cada elemento.
- El personal de mantenimiento encargado de realizar las tareas de sustitución o reparación puede introducir nuevos fallos en los equipos, como consecuencia de errores humanos durante la ejecución de las tareas.
- En los equipos que no operan de manera continua este mantenimiento resulta menos eficaz, ya que es más difícil establecer un control sobre los periodos de trabajo de cada uno de los elementos del equipo.
- Sustituir un elemento dentro del rango de su vida útil no disminuye necesariamente la probabilidad de que se produzca un fallo o avería en el equipo.
- Si la realización de las tareas de mantenimiento preventivo no se programa de manera óptima, puede ser necesario realizar una parada en la producción, con las consiguientes pérdidas económicas que eso conlleva.

5.3.1. Gamas de mantenimiento preventivo

Para la planificación de las tareas de mantenimiento preventivo se han establecido unos intervalos de tiempo para definir la periodicidad con la que deben realizarse. En la Tabla 12 se muestran los intervalos considerados.

Periodicidad	Abreviatura
Diaria	D
Semanal	S
Mensual	M

Trimestral	3M
Anual	A
Bianual	2A

Tabla 12. Periodicidad de las tareas de mantenimiento.

Además de establecer la periodicidad con la que deben realizarse las tareas, hay que decidir quiénes serán los encargados de realizar dichas tareas. Para su realización se contará con técnicos mecánicos y eléctricos, que forman parte del personal propio de la empresa, y con personal subcontratado a otras empresas, como se muestra en la Tabla 13.

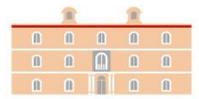
Cualificación	Abreviatura
Mecánico	M
Eléctrico	E
Buzo	B
Especialista Mecánico Subcontratado	EMS
Especialista Eléctrico Subcontratado	EES

Tabla 13. Cualificación del personal que realizará las tareas de mantenimiento.

Una vez establecida la periodicidad de las tareas y el personal que las llevará a cabo, se detallan a continuación todas las tareas que han sido consideradas para cada uno de los equipos.

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Torre de toma	Torre de toma	Inspección visual	A	B
		Limpieza rejillas	A	B
		Inspección mediante ROV sumergible	3M	EMS
	Inmisario submarino	Inspección mediante AUV	A	EMS
Cántara de captación	D-001	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-001 A-E	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Extracción de la bomba	A	B
		Cambio de aceite	A	M
		Inspección de rodamientos	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	A	E
		Revisión bancada y elementos de sujeción	3M	B
Pozo de bombeo	D-002	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-002 A-F	Revisión dispositivos instrumentación	D	E

		Revisión de válvulas	S	M
		Extracción de la bomba	A	B
		Cambio de aceite	A	M
		Inspección de rodamientos	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	A	E
		Revisión bancada y elementos de sujeción	3M	B
Desinfección	D-009	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-007 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Acidificación	D-010	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-008 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Coagulación	D-011	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-009 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M



		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Filtros arena-antracita	F-001 A-F	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Limpieza de filtros	M	M
		Cambio de arena	A	EMS
Bomba soplante	S-001	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Limpieza filtro arena	B-005	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Decloración	D-012 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-010 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS

Antiincrustante	D-013 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-011 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS	
Filtros de cartucho	F-002 A-H	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Sustitución de filtros	A	EMS
Agua pretratada	D-003	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-003 A-E	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Ósmosis inversa	Membranas	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Limpieza de membranas	M	M
		Sustitución de membranas	A	EMS
Limpieza membranas	D-006	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-014	Inspección visual	D	M

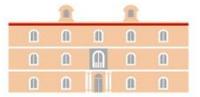
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E	
		Revisión de válvulas	S	M	
		Lubricación de rodamientos	3M	M	
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS	
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS	
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E	
		Revisión de elementos de seguridad	M	M	
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS	
	D-007	Inspección visual	D	M	
		Revisión de fugas y grietas	3M	M	
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E	
		Comprobación de nivel	D	M	
		Revisión válvulas y conexiones	S	M	
	B-015	Inspección visual	D	M	
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E	
		Revisión de válvulas	S	M	
		Lubricación de rodamientos	3M	M	
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS	
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS	
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E	
		Revisión de elementos de seguridad	M	M	
	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS		
	Turbina Pelton	B-004	Inspección visual	D	M
			Revisión dispositivos instrumentación	D	E
			Revisión de válvulas	S	M
			Recogida de muestra de aceite para su análisis	3M	M
			Inspección de los cojinetes	A	EMS
			Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
Sustitución del sello			2A	EMS	
Inspección del rodete			A	EMS	
Revisión del generador mediante termografía infrarroja			3M	E	
Revisión de elementos de seguridad			M	M	
Revisión bancada y elementos de sujeción			A	EMS	
Neutralización	D-015 A/B	Inspección visual	D	M	
		Revisión de fugas y grietas	3M	M	
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E	
		Comprobación de nivel	D	M	
		Revisión válvulas y conexiones	S	M	
	B-012 A-D	Inspección visual	D	M	
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E	
		Revisión de válvulas	S	M	
		Lubricación de rodamientos	3M	M	
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante	A	EMS	

		análisis de vibraciones		
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
	D-016 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-013 A-D	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS	
Decantador	D-008	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
Emisario submarino	B-006 A-D	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Sustitución de rodamientos	2A	EMS
		Sustitución de sello mecánico	2A	EMS
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
	Emisario submarino	Inspección mediante AUV	A	EMS
Agua permeada	D-004	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-016 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Sustitución de sello mecánico	2A	EMS

		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Dosificación de CO2	D-014	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación CO2	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
	DF-001 A-F	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
Revisión de fugas y grietas		3M	M	
Lechos de calcita	LC-001 A-G	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Recarga del lecho	S	M
		Lavado a contracorriente	S	M
		Esponjamiento con aire	A	EMS
	B-017 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión de válvulas	S	M
		Lubricación de rodamientos	3M	M
		Sustitución de sello mecánico	2A	EMS
		Revisión de elementos de seguridad	M	M
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Agua potable	D-005 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
Sistema de tuberías	T-001	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-002	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-003	Inspección visual	D	M
		Revisión de fugas y grietas	3M	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Revisión válvulas y conexiones	S	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M

T-004	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-005	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-006	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-007	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-008	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-009	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-010	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-011	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-012	Inspección visual	D	M

	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-013	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-014	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-015	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-016	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-017	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-018	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-019	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M



T-020	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-021	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-022	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-023	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-024	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-025	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	Revisión interior tubería	M	M
	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-026	Inspección visual	D	M
	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E

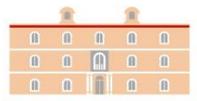
		Revisión válvulas y conexiones	S	M	
		Revisión interior tubería	M	M	
		Comprobación del espesor	A	M	
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M	
	T-027		Inspección visual	D	M
			Revisión de fugas y grietas	3M	M
			Revisión dispositivos instrumentación	D	E
			Revisión válvulas y conexiones	S	M
			Revisión interior tubería	M	M
			Comprobación del espesor	A	M
			Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-028		Inspección visual	D	M
			Revisión de fugas y grietas	3M	M
			Revisión dispositivos instrumentación	D	E
			Revisión válvulas y conexiones	S	M
			Revisión interior tubería	M	M
			Comprobación del espesor	A	M
			Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-029		Inspección visual	D	M
			Revisión de fugas y grietas	3M	M
			Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Revisión válvulas y conexiones			S	M	
Revisión interior tubería			M	M	
Comprobación del espesor			A	M	
Saneamiento y pintado de zonas dañadas			A	M	

Tabla 14. Gamas de mantenimiento preventivo.

5.3.1.1. Gama diaria

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Cántara de captación	D-001	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-001 A-E	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Pozo de bombeo	D-002	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-002 A-F	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Desinfección	D-009	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-007 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Acidificación	D-010	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E

		Comprobación de nivel	D	M
	B-008 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Coagulación	D-011	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-009 A/B	Inspección visual	D	M
Revisión dispositivos instrumentación		D	E	
Filtros arena-antracita	F-001 A-F	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Bomba soplante	S-001	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Limpieza filtros arena	B-005	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Decloración	D-012 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-010 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Antiincrustante	D-013 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-011 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Filtros de cartucho	F-002 A-H	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Agua pretratada	D-003	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-003 A-E	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Ósmosis inversa	Membranas	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Limpieza membranas	D-006	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-014	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	D-007	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-015	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Turbina Pelton	B-004	Inspección visual	D	M



		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Neutralización	D-015 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-012 A-D	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	D-016 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-013 A-D	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Decantador	D-008	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
Emisario submarino	B-006 A-D	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Agua permeada	D-004	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
	B-016 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Dosificación CO2	D-014	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación CO2	D	M
	DF-001 A-F	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Lechos de calcita	LC-001 A-G	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	B-017 A/B	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
Agua potable	D-005	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
		Comprobación de nivel	D	M
Sistema de tuberías	T-001	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-002	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-003	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-004	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-005	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-006	Inspección visual	D	M

	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-007	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-008	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-009	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-010	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-011	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-012	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-013	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-014	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-015	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-016	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-017	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-018	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-019	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-020	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-021	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-022	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-023	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-024	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-025	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-026	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E
T-027	Inspección visual	D	M
	Revisión dispositivos instrumentación	D	E

	T-028	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E
	T-029	Inspección visual	D	M
		Revisión dispositivos instrumentación	D	E

Tabla 15. Gama diaria de mantenimiento preventivo.

5.3.1.2. Gama semanal

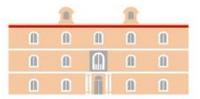
Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Cántara de captación	D-001	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-001 A-E	Revisión de válvulas	S	M
Pozo de bombeo	D-002	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-002 A-F	Revisión de válvulas	S	M
Desinfección	D-009	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-007 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Acidificación	D-010	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-008 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Coagulación	D-011	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-009 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Filtros arena-antracita	F-001 A-F	Revisión de válvulas	S	M
Bomba soplante	S-001	Revisión de válvulas	S	M
Limpieza filtros arena	B-005	Revisión de válvulas	S	M
Decloración	D-012 A/B	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-010 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Antiincrustante	D-013 A/B	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-011 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Filtros de cartucho	F-002 A-H	Revisión de válvulas	S	M
Agua pretratada	D-003	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-003 A-E	Revisión de válvulas	S	M
Ósmosis inversa	Membranas	Revisión de válvulas	S	M
Limpieza membranas	D-006	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-014	Revisión de válvulas	S	M
	D-007	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-015	Revisión de válvulas	S	M
Turbina Pelton	B-004	Revisión de válvulas	S	M
Neutralización	D-015 A/B	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-012 A-D	Revisión de válvulas	S	M
	D-016 A/B	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-013 A-D	Revisión de válvulas	S	M
Decantador	D-008	Revisión válvulas y conexiones	S	M
Emisario submarino	B-006 A-D	Revisión de válvulas	S	M
Agua permeada	D-004	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	B-016 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Dosificación CO2	D-014	Revisión válvulas y conexiones	S	M

	DF-001 A-F	Revisión de válvulas	S	M
Lechos de calcita	LC-001 A-F	Revisión de válvulas	S	M
		Recarga del lecho	S	M
		Lavado a contracorriente	S	M
	B-017 A/B	Revisión de válvulas	S	M
Agua potable	D-005	Revisión válvulas y conexiones	S	M
Sistema de tuberías	T-001	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-002	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-003	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-004	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-005	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-006	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-007	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-008	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-009	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-010	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-011	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-012	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-013	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-014	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-015	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-016	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-017	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-018	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-019	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-020	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-021	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-022	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-023	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-024	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-025	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-026	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-027	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-028	Revisión válvulas y conexiones	S	M
	T-029	Revisión válvulas y conexiones	S	M

Tabla 16. Gama semanal de mantenimiento preventivo.

5.3.1.3. Gama mensual

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Desinfección	B-007 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Acidificación	B-008 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Coagulación	B-009 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Filtros arena-antracita	F-001 A-F	Limpieza de filtros	M	M

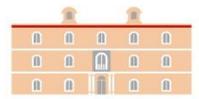


Bomba soplante	S-001	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Limpieza filtros arena	B-005	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Declaración	B-010 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Antiincrustante	B-011 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Agua pretratada	B-003 A-E	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Ósmosis inversa	Membranas	Limpieza de membranas	M	M
Limpieza membranas	B-014	Revisión de elementos de seguridad	M	M
	B-015	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Turbina Pelton	B-004	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Neutralización	B-012 A-D	Revisión de elementos de seguridad	M	M
	B-013 A-D	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Emisario submarino	B-006 A-D	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Agua permeada	B-016 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Lechos de calcita	B-017 A/B	Revisión de elementos de seguridad	M	M
Sistema de tuberías	T-007	Revisión interior tubería	M	M
	T-014	Revisión interior tubería	M	M
	T-019	Revisión interior tubería	M	M
	T-021	Revisión interior tubería	M	M
	T-022	Revisión interior tubería	M	M
	T-023	Revisión interior tubería	M	M
	T-024	Revisión interior tubería	M	M
	T-025	Revisión interior tubería	M	M
	T-026	Revisión interior tubería	M	M
	T-027	Revisión interior tubería	M	M
	T-028	Revisión interior tubería	M	M
	T-029	Revisión interior tubería	M	M

Tabla 17. Gama mensual de mantenimiento preventivo.

5.3.1.4. Gama trimestral

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Torre de toma	Torre de toma	Inspección mediante ROV sumergible	3M	EMS
Cántara de captación	D-001	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-001 A-E	Revisión bancada y elementos de sujeción	3M	B
Pozo de bombeo	D-002	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-002 A-F	Revisión bancada y elementos de sujeción	3M	B
Desinfección	D-009	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-007 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Acidificación	D-010	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-008 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Coagulación	D-011	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-009 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E



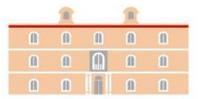
Bomba soplante	S-001	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Limpieza filtros arena	B-005	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Decloración	D-012 A/B	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-010 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Antiincrustante	D-013 A/B	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-011 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Agua pretratada	D-003	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-003 A-E	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
Limpieza membranas	D-006	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-014	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
	D-007	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-015	Lubricación de rodamientos	3M	M
Revisión del motor mediante termografía infrarroja		3M	E	
Turbina Pelton	B-004	Recogida de muestra de aceite para su análisis	3M	M
		Revisión del generador mediante termografía infrarroja	3M	E
Neutralización	D-015 A/B	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-012 A-D	Lubricación de rodamientos	3M	M
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	3M	E
	D-016 A/D	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-013 A-D	Lubricación de rodamientos	3M	M
Revisión del motor mediante termografía infrarroja		3M	E	
Decantador	D-008	Revisión de fugas y grietas	3M	M
Emisario submarino	B-006 A-D	Lubricación de rodamientos	3M	M
Agua permeada	D-004	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	B-016 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
Dosificación CO2	D-014	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	DF-001 A-F	Revisión de fugas y grietas	3M	M
Lechos de calcita	B-017 A/B	Lubricación de rodamientos	3M	M
Agua potable	D-005	Revisión de fugas y grietas	3M	M
Sistema de tuberías	T-001	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-002	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-003	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-004	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-005	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-006	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-007	Revisión de fugas y grietas	3M	M
	T-008	Revisión de fugas y grietas	3M	M

T-009	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-010	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-011	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-012	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-013	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-014	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-015	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-016	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-017	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-018	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-019	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-020	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-021	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-022	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-023	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-024	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-025	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-026	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-027	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-028	Revisión de fugas y grietas	3M	M
T-029	Revisión de fugas y grietas	3M	M

Tabla 18. Gama trimestral de mantenimiento preventivo.

5.3.1.5. Gama anual

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Torre de toma	Torre de toma	Inspección visual	A	B
		Limpieza rejillas	A	B
Inmisario submarino	Inmisario submarino	Inspección mediante AUV	A	EMS
Cántara de captación	B-001 A-E	Extracción de la bomba	A	B
		Cambio de aceite	A	M
		Inspección de rodamientos	A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	A	E
Pozo de bombeo	B-002 A-F	Extracción de la bomba	A	B
		Cambio de aceite	A	M
		Inspección de rodamientos	A	EMS
		Revisión del motor mediante termografía infrarroja	A	E
Desinfección	B-007 A/B	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Acidificación	B-008 A/B	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Coagulación	B-009 A/B	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Filtros arena-antracita	F-001 A-F	Cambio de arena	A	EMS
Bomba soplante	S-001	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS



		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Limpieza filtros arena	B-005	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Declaración	B-010 A/B	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Antiincrustante	B-011 A/B	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Filtros de cartucho	F-002 A-H	Sustitución de filtros	A	EMS
Agua pretratada	B-003 A-E	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Ósmosis inversa	Membranas	Sustitución de membranas	A	EMS
Limpieza membranas	B-014	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
	B-015	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Turbina Pelton	B-004	Inspección de los cojinetes	A	EMS
		Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Inspección del rodete	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Neutralización	B-012 A-D	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
	B-013 A-D	Comprobación de equilibrado y alineación mediante análisis de vibraciones	A	EMS
		Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Emisario submarino	B-006 A-D	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
	Emisario submarino	Inspección mediante AUV	A	EMS
Agua permeada	B-016 A/B	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Lechos de calcita	LC-001 A-F	Esponjamiento con aire	A	EMS
	B-017 A/B	Revisión bancada y elementos de sujeción	A	EMS
Sistema de tuberías	T-007	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-014	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-019	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-021	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-022	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-023	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-024	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
	T-025	Comprobación del espesor	A	M
		Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-026	Comprobación del espesor	A	M	

	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-027	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-028	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-029	Comprobación del espesor	A	M
	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-001	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-002	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-003	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-004	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-005	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-006	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-008	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-009	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-010	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-011	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-012	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-013	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-015	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-016	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-017	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-018	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M
T-020	Saneamiento y pintado de zonas dañadas	A	M

Tabla 19. Gama anual de mantenimiento preventivo.

5.3.1.6. Gama bianual

Sistema	Subsistema	Actividad	Periodicidad	Cualificación
Cántara de captación	B-001 A-E	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Pozo de bombeo	B-002 A-F	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Desinfección	B-007 A/B	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Acidificación	B-008 A/B	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Coagulación	B-009 A/B	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Bomba soplante	S-001	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Limpieza filtros arena	B-005	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Decloración	B-010 A/B	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Antiincrustante	B-011 A/B	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Agua pretratada	B-003 A-E	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Limpieza membranas	B-014	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
	B-015	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Turbina Pelton	B-004	Sustitución del sello	2A	EMS
Neutralización	B-012 A-D	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
	B-013 A-D	Sustitución del sello mecánico	2A	EMS
Emisario submarino	B-006 A-D	Sustitución de rodamientos	2A	EMS
		Sustitución de sello mecánico	2A	EMS
Agua permeada	B-016 A/B	Sustitución de sello mecánico	2A	EMS
Lechos de calcita	B-017 A/B	Sustitución de sello mecánico	2A	EMS

Tabla 20. Gama bianual de mantenimiento preventivo.

5.4. Mantenimiento correctivo

Se conoce como mantenimiento correctivo a aquel que se realiza después del fallo de una máquina. Mediante este tipo de mantenimiento se persigue no solamente reparar el fallo para devolver la máquina a su estado de funcionamiento, sino también buscar, diagnosticar y corregir la causa que provocó el fallo para evitar que este vuelva a producirse.

La ventaja principal que ofrece este tipo de mantenimiento es que permite una rápida reparación de la máquina y con ello devolverla a su estado de funcionamiento a la mayor brevedad posible, evitando así que puedan producirse paradas que afecten en mayor medida a la producción. Además, al corregir la causa original del fallo se evita que este pueda reproducirse a corto plazo.

Sin embargo, también presenta una serie de inconvenientes entre los que se encuentran los siguientes:

- Los fallos se producen de manera imprevisible, por lo que no se puede planificar el trabajo de mantenimiento.
- Como los fallos se pueden producir en cualquier momento, se necesita un almacén con los repuestos suficientes para poder actuar cuando ocurra el fallo, evitando así los tiempos de espera mientras se reciben los repuestos.
- Si el tiempo de reparación se incrementa más de lo previsto, pueden ocasionarse paradas de producción importantes, con las consiguientes repercusiones económicas para la empresa.
- Debido al carácter imprevisto de las averías, estas pueden ocasionar daños graves a la máquina, ya que el fallo de un elemento puede afectar a otros elementos que estén conectados.
- No se reduce el riesgo de daños en los trabajadores y en las instalaciones como consecuencia de la imprevisibilidad de las averías, las cuales pueden dar lugar a accidentes graves.

5.4.1. Organización del personal de mantenimiento

El organigrama del personal de mantenimiento se muestra en la Figura 45. Toda la plantilla será personal propio de la empresa, a excepción de los especialistas mecánicos y eléctricos y los buzos, que se subcontratarán a otras empresas. Como se puede observar, hay tres técnicos mecánicos y tres técnicos eléctricos, los necesarios para cubrir los tres turnos de trabajo de la planta, ya que esta funciona 24 horas al día.

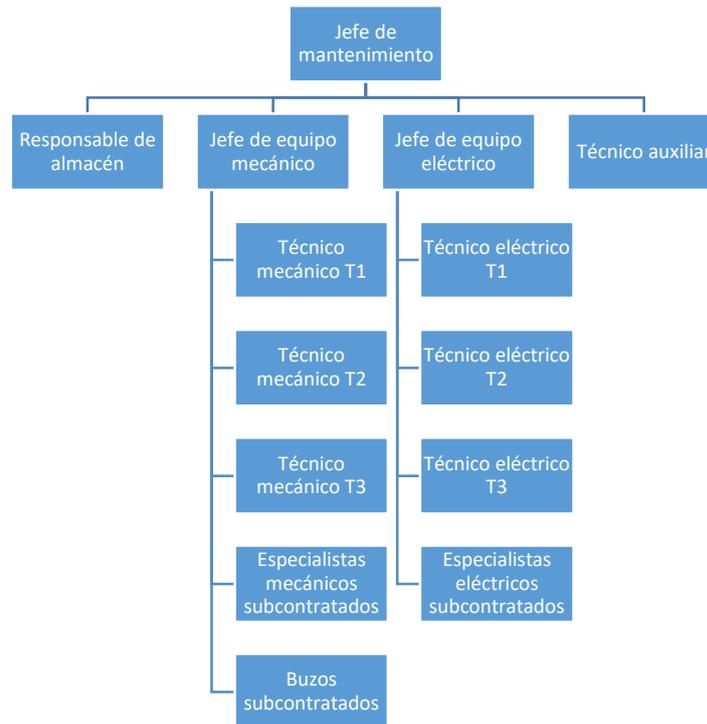


Figura 45. Organigrama del personal de mantenimiento.

A continuación se describirán las funciones a realizar por el personal de mantenimiento.

El **jefe de mantenimiento** es el máximo responsable del área de mantenimiento de la planta. Es el encargado de coordinar el mantenimiento desde su parte técnica, organizativa y económica. Desempeña las siguientes funciones:

- Determinar las políticas a seguir en el departamento de mantenimiento, asegurándose de que se cumplen los objetivos establecidos por la empresa para el área de mantenimiento.
- Elaborar los presupuestos de mantenimiento.
- Analizar la criticidad de cada uno de los equipos que componen la planta y sus posibles fallos.
- Elaborar el plan de mantenimiento a corto, medio y largo plazo.
- Elaborar la lista de repuestos mínimos.
- Asignar los recursos que correspondan para la realización de cada tarea.
- Planificar el mantenimiento programado y supervisar el cumplimiento del mismo.
- Solucionar los imprevistos que puedan producirse durante las tareas de mantenimiento.

El jefe de mantenimiento cuenta con la ayuda de un **técnico auxiliar** que le sirve de apoyo, en el cual delega parte de sus responsabilidades. Entre las funciones que realiza el técnico auxiliar podemos destacar la preparación de informes periódicos de mantenimiento, informes de intervención para revisiones o averías de equipos y la elaboración de propuestas de mejora, las cuales son enviadas al jefe de mantenimiento para su aprobación.

Los **jefes de equipo** dependen directamente del jefe de mantenimiento y son los encargados de controlar una serie de equipos e instalaciones concretas de la planta, ya que



cuentan con un grado de especialización mayor. En esta instalación habrá dos jefes de equipo, uno encargado del mantenimiento de los sistemas mecánicos y otro encargado de los sistemas eléctricos e instrumentación. A diferencia del jefe de mantenimiento, que se ocupa más del mantenimiento a medio y largo plazo, los jefes de equipo se centran más en la resolución a corto plazo de las incidencias que ocurran en sus respectivas áreas. El resto de funciones que realizan son las siguientes:

- Asegurarse de que los técnicos a su cargo rinden de manera adecuada y realizan los trabajos correctamente.
- Solucionar los problemas que pudieran producirse durante las tareas.
- Proporcionar al personal a su cargo los medios técnicos y el material que requieran.

El **responsable de almacén** es el encargado de controlar y organizar el almacén de repuestos. Depende directamente del jefe de mantenimiento. Las funciones que debe llevar a cabo son las siguientes:

- Asegurarse de que el almacén se encuentre limpio y ordenado.
- Establecer un sistema que permita la rápida localización de los repuestos.
- Asegurarse de que el material se almacena en las condiciones adecuadas, prestando especial atención a los materiales especiales que requieran de unas condiciones determinadas.
- Comunicar al departamento de compras cuando un repuesto se agote o llegue al nivel de stock mínimo.
- Realizar los inventarios de stock de repuesto.
- Supervisar los movimientos de almacén para que estos se realicen de forma controlada.

Los **técnicos mecánicos** dependen jerárquicamente del jefe de equipo mecánico y son los encargados de realizar las tareas de reparación, desmontaje, sustitución, montaje y ajuste de los elementos mecánicos de un equipo. También realizan las revisiones de mantenimiento periódicas de los equipos mecánicos.

Los **especialistas mecánicos** subcontratados serán los encargados de realizar todas aquellas tareas que estén fuera de las competencias de los técnicos mecánicos o requieran de un grado de especialización mayor. Dependen directamente del jefe de equipo mecánico. Entre las tareas que pueden realizar se encuentran las siguientes:

- Tareas de alineación.
- Equilibrado de máquinas.
- Soldadura.
- Reparaciones fuera de taller.

Los **buzos** subcontratados dependen directamente del jefe de equipo mecánico. Se harán cargo de las tareas de mantenimiento correspondientes a la torre de toma y al inmisario y emisario submarino.

Los **técnicos eléctricos** dependen directamente del jefe de equipo eléctrico y son los responsables de realizar las siguientes tareas:

- Conexión y desconexión de equipos conectados a líneas de media tensión.
- Conexión y desconexión de elementos y equipos de baja tensión.



- Comprobaciones de mantenimiento y reparaciones en cuadros eléctricos.
- Revisión de subestaciones eléctricas.
- Verificación de aislamientos y derivaciones a tierra de los sistemas eléctricos.
- Reparaciones de iluminación.

Ya que no se dispone de técnicos instrumentistas, los técnicos eléctricos también serán los encargados de la calibración, ajuste y reparación de instrumentos de medida, de los actuadores y de los lazos de control que los gobiernan.

Los **especialistas eléctricos** subcontratados realizarán las tareas que requieran de un grado de especialización mayor que el de los técnicos eléctricos de la planta. Estarán siempre supervisados por el jefe de equipo eléctrico y dependen directamente de él.

5.4.2. Repuestos

Uno de los factores más importantes para que el mantenimiento correctivo de cualquier instalación funcione de manera óptima es disponer de los repuestos adecuados en el almacén de repuestos de la planta, de manera que sea posible realizar las reparaciones correspondientes de la manera más rápida posible. Con el objetivo de determinar que repuestos deben incluirse dentro del stock de repuestos del almacén hay que tener en cuenta los siguientes factores: la criticidad del fallo, la frecuencia de consumo, el plazo de entrega y el coste del repuesto.

Como se ha visto en capítulos anteriores, los equipos críticos son aquellos en los que un fallo puede desencadenar en consecuencias importantes para la producción, la seguridad o el medioambiente. Por tanto, los elementos de los equipos que presentan una criticidad alta deben incluirse en el stock de repuesto, ya que pueden evitar averías que tengan un fuerte impacto en cualquiera de los tres aspectos mencionados.

Si se dispone de información relacionada con los componentes que se han comprado a lo largo de los últimos años o del histórico de averías producidas, puede determinarse la frecuencia de consumo de los componentes y establecer que elementos se consumen habitualmente. De esta manera, aquellos elementos que se consuman habitualmente deben considerarse para formar parte del stock de repuestos, al igual que los consumibles cuyo cambio sea frecuente y tengan un bajo coste.

El plazo de entrega debe tenerse muy en cuenta para determinar que componentes formaran parte del stock de repuestos. Muchos elementos se encuentran siempre disponibles en proveedores cercanos, por lo que su plazo de entrega suele ser inmediato. Sin embargo, puede darse el caso de componentes que no se encuentran normalmente en stock en los proveedores locales, que tengan un plazo de entrega de varias semanas, o incluso algunos que tengan que fabricarse bajo pedido y su entrega se alargue aún más. Por tanto, los elementos que pertenezcan a equipos de criticidad alta y cuyo plazo de entrega no sea inmediato deberán considerarse como candidatos a formar parte del stock de repuestos.

El coste es un factor determinante a la hora de establecer si un repuesto debe incluirse dentro del stock de repuestos. Aquellas piezas que presentan un precio muy elevado no es recomendable mantenerlas dentro del stock de repuestos, ya que supondrían un capital inmovilizado muy elevado, cuando el objetivo que se persigue es minimizar dicho capital.

Una vez que han sido expuestos los factores más importantes para la selección del stock de repuestos, se puede realizar una clasificación de los tipos de repuestos. La clasificación se divide en las siguientes categorías:

- Categoría A: Incluye los elementos indispensables para el mantenimiento de la planta, ya que un fallo en alguno de ellos puede provocar graves consecuencias para la producción o la seguridad y el medioambiente. Por tanto, serán los elementos que formarán parte del stock de repuestos. Entre estos elementos podemos destacar algunos como los siguientes:
 - Membranas de ósmosis.
 - Filtros de cartucho.
 - Filtros de arena-antracita.
 - Sensores de instrumentación.
 - Sellos mecánicos.
 - Rodamientos y cojinetes.
 - Aditivos para pretratamiento.
 - Aceites lubricantes.
- Categoría B: Esta categoría la constituyen aquellos elementos que aunque no forman parte del stock de repuestos es recomendable tener localizados. Así, en caso de necesidad de alguno de estos elementos por una avería, no es necesario buscar proveedores para solicitar ofertas, ya que se conocen los proveedores, el precio y el plazo de entrega de cada elemento.
 - Repuestos eléctricos para los motores.
 - Hélices para los agitadores.
 - Tuberías.
- Categoría C: Aquí se incluyen los elementos que se consumen habitualmente. Normalmente se trata de consumibles que están disponibles en proveedores locales lo que facilita los trámites burocráticos de compra y pueden ser suministrados de manera muy rápida.
 - Tornillería.
 - Racorería.
 - Elementos de iluminación como lámparas o bombillas.
 - Ánodos de sacrificio.
 - Material de limpieza.
 - Juntas.
 - Filtros en línea tipo Y.
- Categoría D: Incluye los elementos en los que un fallo no ocasiona consecuencias para la producción, la seguridad o el medioambiente, por lo que se trata de piezas que no es necesario prever.

5.4.3. Partes de incidencias

Cada vez que se produzca un fallo en alguno de los elementos que componen los distintos equipos se deberá emitir un parte de incidencias, un documento que será rellenado en primera instancia por el técnico u operador que estuviese trabajando o revisando el equipo que ha sufrido el fallo, en el que describirá la avería que se ha producido y establecerá una prioridad para determinar la urgencia de la reparación. Posteriormente el parte será remitido



al responsable de mantenimiento a cargo del equipo dañado, quien comprobará el alcance de la avería y asignará a los técnicos necesarios para su reparación. Una vez realizada la reparación oportuna, los técnicos que la han llevado a cabo deberán detallar las operaciones que han realizado, así como el número de horas que han empleado y los materiales que han utilizado. También se debe indicar si la reparación ha sido terminada o es necesario realizar alguna tarea de reparación adicional. Por último, el responsable de mantenimiento debe garantizar que la reparación se ha realizado de manera satisfactoria y dejar constancia de su conformidad.

PARTE DE INCIDENCIAS			Número parte:
Prioridad	Urgente <input type="checkbox"/>	Prioritaria <input type="checkbox"/>	Normal <input type="checkbox"/>
Fecha	Solicitante	Equipo	
Descripción de la avería:			
Responsable de mantenimiento	Operario	Horas empleadas	Horas extra
Observaciones:			
Material empleado:			
Trabajo terminado:	SI	Fecha finalización:	
	NO	Control y conformidad:	

Figura 46. Parte de incidencias.

5.4.4. Causas de fallos

Como se ha comentado anteriormente, el mantenimiento correctivo no se centra exclusivamente en la reparación de las averías que se producen, sino que también busca

determinar las causas que las originan para evitar que estas vuelvan a producirse en un futuro. La gran mayoría de los fallos que se registran son producidos por uno de los siguientes motivos:

- Por fallos en el material.
- Por errores humanos durante la operación del equipo.
- Por errores humanos durante el mantenimiento del equipo.
- Por anomalías externas.

A continuación, se ahondará con más detalle en cada una de las cuatro causas mencionadas.

Los fallos en el material se producen cuando un elemento se encuentra en un estado que le impide desarrollar la función para la cual fue diseñado. Entre los principales motivos por los que puede fallar un material destacamos los siguientes:

- Por desgaste. Debido al uso continuado de un elemento sus propiedades van disminuyendo hasta que se alcanza un límite en el cual el material es incapaz de resistir los esfuerzos a los que está sometido y se produce el fallo.
- Por rotura. La rotura de un material se produce cuando se sobrepasa su límite elástico, como consecuencia de una aplicación excesiva de fuerzas. La rotura puede considerarse como dúctil o frágil, en función de si el material ha sufrido deformación o no durante el proceso de rotura.
- Por fatiga. El fallo por fatiga de un material se produce cuando la pieza se somete a esfuerzos dinámicos cíclicos. Aunque estas fuerzas no sobrepasan el límite elástico del material, provocan una serie de defectos que se originan en la superficie y se extienden hacia el interior de la pieza, provocando el fallo.

Los errores humanos durante la operación del equipo pueden ocurrir por alguna de las siguientes razones:

- Actuación incorrecta en alguna de las tareas de operación del equipo, que ocasiona una avería.
- Interpretar erróneamente la lectura de los indicadores o sensores de proceso.
- Estado físico del operador, si no se encuentra en las condiciones óptimas para trabajar.
- Estado psicológico del operador, pudiendo estar afectado por desmotivación, depresión, etc.
- Falta de instrucciones a seguir durante la operación del equipo por parte de su responsable.
- Falta de formación para desempeñar adecuadamente las tareas de operación.

También se pueden producir errores humanos durante el mantenimiento del equipo, principalmente debidos a las siguientes causas:

- Acción incorrecta o imprudente durante la reparación de una avería, que acaba desencadenando en una avería mayor.
- Fallo durante las tareas de revisión de los equipos, obviando alguna indicación que pudiera prevenir una avería.
- Realizar un diagnóstico erróneo de las causas de una avería.
- Estado físico del operador, si no se encuentra en las condiciones óptimas para trabajar.

- Estado psicológico del operador, pudiendo estar afectado por desmotivación, depresión, etc.
- Falta de formación para desempeñar adecuadamente las tareas de mantenimiento.

En relación a los fallos por anomalías externas, estos se producen cuando las condiciones ambientales o externas en las que trabaja un equipo difieren de las condiciones óptimas para las cuales fue diseñado. Factores como la temperatura, la humedad o la suciedad suelen ser los causantes de muchas averías. Por ejemplo, si un equipo trabaja en unas condiciones ambientales donde la temperatura es más elevada que la recomendada, pueden producirse fallos en sus componentes que deriven en una avería importante.

5.4.5. Análisis de fallos

El mantenimiento está sujeto a un proceso de mejora continuo con el objetivo de alcanzar mejores resultados. Para lograrlo, el análisis de fallos resulta fundamental por dos motivos principales. En primer lugar nos permite estudiar las causas que provocan las averías. Una vez determinadas las causas se proponen una serie de medidas para actuar sobre ellas de manera eficaz, evitando su reparación.

A la hora de realizar un análisis de fallos es muy importante recopilar la máxima información posible sobre el mismo. Entre los datos que recopilemos nunca deben faltar los siguientes:

- Una descripción de la avería, donde se detalle lo que ocurrió antes, durante y después del fallo, incluyendo las tareas de mantenimiento que se hayan realizado posteriormente a la avería.
- La información referente a las condiciones de trabajo de la máquina, incluyendo datos de cualquier variable que se pueda medir, como temperatura, presión, caudal, etc.
- La información referente a las condiciones ambientales y externas a las que estaba sometida la máquina, como temperatura ambiente, humedad, temperatura del refrigerante, etc.
- Las últimas tareas de mantenimiento realizadas al equipo, indicando si se detectaron anomalías.
- Los fallos o averías que haya tenido el equipo durante los últimos años, haciendo especial hincapié en los fallos similares al que se está estudiando.

Cuando se produce una avería, esta puede estar originada por varias de las causas mencionadas en el apartado anterior, lo que dificulta determinar de manera precisa cual fue la causa que tuvo una mayor influencia en la avería. Por el mismo motivo, cuando confluyen varias causas se hace difícil determinar qué medidas preventivas son las más apropiadas. No obstante, a continuación se comentarán algunas de las medidas preventivas que podemos aplicar en función de la causa del fallo:

Si es debido a un fallo en el material, las medidas a adoptar serían las siguientes:

- Si el fallo se ha producido por desgaste de la pieza, la solución más apropiada será la de tratar de reducir el desgaste de la misma, por ejemplo con una lubricación mejor. En caso de que no sea posible, lo ideal sería analizar la vida útil de la pieza para programar su sustitución con la antelación suficiente.



- Si el fallo se ha producido por rotura de la pieza, habrá que estudiar la posibilidad de fabricar la pieza en otro material que presente mejores propiedades mecánicas y que sea capaz de resistir los esfuerzos a los que estará sometida.
- Si el fallo se ha producido por fatiga, las posibilidades serían: cambiar el material por otro con mejores propiedades mecánicas, aplicar tratamientos superficiales para endurecer el material, reducir los esfuerzos cíclicos a los que se somete la pieza o realizar modificaciones en el diseño de la pieza para evitar zonas donde la concentración de tensiones es elevada.

Si el fallo es debido a un error humano durante la operación del equipo, entre las medidas a aplicar podemos encontrar las siguientes:

- Introducción de la técnica de calidad poka-yoke, la cual se caracteriza por evitar por completo el error humano durante la operación de un sistema. Un ejemplo de aplicación de esta técnica es el sistema de conexión que emplean los dispositivos USB, el cual solamente es posible conectar en una posición determinada, evitando así que la persona pueda conectar mal el dispositivo.
- Fomento de la motivación del personal, reduciendo así la posibilidad de que puedan cometer errores como consecuencia de encontrarse en mal estado psicológico.
- Realización de cursos de formación del personal, para evitar que se produzcan fallos como consecuencia de la ausencia de conocimientos por parte de los operadores.

Si el fallo es debido a un error humano durante el mantenimiento del equipo, se pueden adoptar las siguientes medidas:

- Al igual que en el caso anterior, fomentar la motivación del personal puede reducir los errores que puedan cometerse.
- Establecer una serie de procedimientos de trabajo en los cuales se detallen perfectamente todas las tareas necesarias para realizar cada trabajo. De esta forma se reduce la posibilidad de que los técnicos de mantenimiento no ejecuten correctamente los trabajos de mantenimiento, como consecuencia de la omisión o mala realización de alguna de las tareas.

Si el fallo es debido a anomalías externas, la medida preventiva más evidente es la corrección de las condiciones externas para adaptarlas a las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo. En caso de que no sea posible controlar las condiciones externas, como es el caso de los equipos que están expuestos a factores climatológicos, hay que intentar minimizar los daños que puedan sufrir, ya sea mediante la sustitución más frecuente de ciertos elementos o mediante revisiones periódicas más exhaustivas que permitan anticipar los fallos.

5.4.6. Gestión de mantenimiento asistido por ordenador

La gestión del mantenimiento asistido por ordenador, conocida por las siglas GMAO, es una herramienta software que sirve de ayuda para gestionar el mantenimiento de la empresa. Se trata de una base de datos que contiene información sobre la empresa y las tareas de mantenimiento. El hecho de disponer de esta base de datos favorece la realización de las tareas de mantenimiento de forma más eficaz y segura.

Las funciones que desempeña un software GMAO son las siguientes:

- El almacenamiento de toda la información relacionada con el mantenimiento, de forma que pueda ser consultada en cualquier momento.
- Proporcionar información detallada que pueda servir de ayuda para el análisis de los resultados del mantenimiento y para la toma de decisiones.
- Mejorar la planificación del mantenimiento.
- Proporcionar las herramientas necesarias para realizar el control y seguimiento del mantenimiento de manera adecuada.
- Adaptarse a las necesidades de cada empresa, ofreciendo productos específicos para cada sector industrial.

Dentro de la variada oferta de este tipo de software existen productos destinados a mercados específicos, como el mantenimiento industrial o el mantenimiento de flotas de vehículos, y a un mercado más general. Además, dependiendo de las necesidades de cada empresa, se puede contratar un paquete software con más o menos funcionalidades. Para nuestra instalación, bastará un software que incluya los siguientes módulos:

- Ordenes de trabajo. Incluye toda la información correspondiente a los trabajos de mantenimiento: personal que realiza el trabajo, material empleado, partes de incidencias, análisis de averías, costes, etc.
- Mantenimiento preventivo. Incluye la información relacionada con las tareas de mantenimiento preventivo, lo que permite realizar un seguimiento de las tareas de mantenimiento programadas, gracias al cual se puede comprobar fácilmente el estado de las mismas y determinar si hay retrasos o tareas pendientes.
- Gestión de activos. Incluye toda la información relacionada con los materiales y equipos: periodos de garantía, contratos de servicio, certificados de calidad y cualquier otra información relevante.
- Recursos humanos. Permite controlar y gestionar los recursos humanos del área de mantenimiento. Facilita la asignación de recursos humanos a cada tarea de mantenimiento y facilita el seguimiento de las mismas.
- Control de inventarios. Sirve para controlar y gestionar del stock de repuestos. Permite realizar un seguimiento de los materiales o repuestos que se han agotado, así como de los que están pendientes de entrega y los que se solicitarán en un futuro.
- Seguridad: Este módulo incluye toda la información relacionada con los protocolos y normas de seguridad. También puede incluir información sobre el almacenaje de sustancias peligrosas o cualquier producto o equipo que pueda suponer un riesgo para la instalación.

Entre los programas software más extendidos y utilizados en empresas de primer orden podemos destacar los dos siguientes:

- Por un lado se encuentra el software SAP R/3, desarrollado por la empresa alemana SAP SE. Se trata de un sistema de planificación de recursos empresariales, también conocido como ERP (Enterprise Resource Planning). A diferencia de un software GMAO, un ERP es un sistema que abarca diversas funciones de la empresa y dispone de mucha más información. La gran ventaja de este tipo de sistemas es que permiten gestionar todas las funciones de la empresa con un mismo programa. SAP R/3 presenta una estructura modular, es decir, está formado por un conjunto de módulos que corresponden a las diferentes áreas de la empresa. El módulo correspondiente a la gestión del mantenimiento es el PM (Plant Maintenance), y realiza las funciones

equivalentes a un software GMAO. En la Figura 47 se muestran algunos de los módulos que componen SAP R/3.



Figura 47. Estructura modular de SAP R/3.

- El segundo software es Maximo, desarrollado por IBM. Se trata de un sistema de gestión de activos empresariales, también conocido por sus siglas en inglés como EAM (Enterprise Asset Management). Un EAM se centra en gestionar el ciclo de vida de cada uno de los activos de la empresa con el objetivo de maximizar su valor. Puede abarcar diferentes áreas dentro de la empresa, incluyendo los procesos de diseño, producción, explotación y mantenimiento. Por tanto, la diferencia más importante entre un sistema EAM y un sistema GMAO es que los sistemas EAM generalmente son capaces de gestionar las funciones que se realizarían con un GMAO. Dicho de otro modo, los sistemas GMAO suelen estar integrados dentro de los sistemas EAM.

Finalmente, las ventajas más importantes que nos aporta el uso de un sistema de gestión de mantenimiento asistido por ordenador son las siguientes:

- Permite optimizar los recursos humanos y materiales.
- Facilita el seguimiento de las tareas de mantenimiento programadas.
- Ayuda a mejorar la planificación de las tareas de mantenimiento.
- Disminuye el tiempo de las paradas de producción, lo que implica una mayor productividad y disponibilidad de los equipos.
- Aporta información actualizada de todos los equipos y componentes del proceso productivo.
- Permite analizar las averías e incidencias ocurridas para proponer medidas correctoras.
- Permite realizar una previsión de los materiales y piezas que se consumirán en el futuro.
- Permite conocer al instante los gastos ocasionados por cualquier incidente o avería.
- Facilita y mejora el seguimiento de las tareas subcontratadas.
- Permite ajustar el mantenimiento programado a las necesidades reales de la planta.



Capítulo 6

6. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

6.1. Introducción

Como se ha visto en el Capítulo 5, durante la gestión del mantenimiento se realiza un esfuerzo por documentar de la manera más completa posible todas las averías y acciones de mantenimiento que se llevan a cabo. Gracias a ello, es posible analizar y evaluar la gestión del mantenimiento desarrollado, especialmente los aspectos relacionados con el mantenimiento correctivo. Existen diferentes herramientas de eficacia contrastada para detectar aquellos aspectos que deben modificarse para conseguir mejoras capaces de incrementar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos, así como de minimizar los costes de mantenimiento a corto y medio plazo. En el presente Capítulo se ahondará en la utilidad que presentan las siguientes tres herramientas:

- ❖ Diagrama de Pareto.
- ❖ Análisis Causa Raíz.
- ❖ Mapa Causal.

6.2. Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto, también conocido como Distribución A-B-C, es un gráfico de barras que permite ordenar una serie de datos en orden decreciente, de izquierda a derecha. El objetivo que se persigue con la utilización de este diagrama es analizar un problema y determinar cuáles son las causas principales que lo generan. Está basado en el principio enunciado por Vilfredo Pareto, quien estableció que el 20% de la población ostentaba el 80% de la riqueza, mientras que el 80% restante ostentaba solamente el 20% de la riqueza. Este principio, también conocido como regla del 80-20, se puede aplicar a numerosos ámbitos, tales como sistemas de producción, control de calidad, gestión de almacenes, ventas, ingeniería de software, mantenimiento industrial, etc. Estas cifras no son exactas, por lo que pueden variar en función de cada caso. En nuestro caso, enfocado al mantenimiento industrial, emplearemos esta regla para analizar cuáles son las principales causas que provocan la mayor parte del tiempo de indisponibilidad de una máquina. El objetivo que se persigue es centrar los recursos y las tareas de mantenimiento en revisar y mantener aquellos elementos y equipos que son verdaderamente críticos. De esta manera, se pretende optimizar el presupuesto destinado a mantenimiento, evitando así no incurrir en gastos de mantenimiento innecesarios como la revisión de elementos y equipos cuyo fallo no tiene repercusión en la producción o seguridad de la planta.

A continuación se realizará un diagrama de Pareto de un caso real, donde se analizarán las causas de fallo de un turbocompresor y se analizarán cuáles son las que generan el mayor tiempo de indisponibilidad del equipo.

El primer paso consiste en recopilar en una tabla las causas que provocan una avería en el turbocompresor y la frecuencia con la que ocurre cada una de ellas. Las causas se ordenarán de mayor a menor en función de la frecuencia con la que ocurran.

Causa del fallo	Frecuencia
Rotor/eje	22

Instrumentación	21
Otras causas	20
Cojinetes radiales	13
Alabes/rodete	8
Sellos	6
Cojinetes axiales	6
Bobinado motor	3
Diafragma	1
TOTAL	100

Tabla 21. Frecuencia de las causas de fallo de un turbocompresor.

Una vez realizada la primera tabla, se añadirán los datos correspondientes al porcentaje de indisponibilidad que provoca cada una de las causas. También se añadirán en una columna los datos de indisponibilidad acumulados por varias causas.

Causa del fallo	Frecuencia	Indisponibilidad (%)	% Acumulado
Rotor/eje	22	39,42	39,42
Instrumentación	21	1,45	40,87
Otras causas	20	20,44	61,31
Cojinetes radiales	13	5,11	66,42
Alabes/rodete	8	13,14	79,56
Sellos	6	4,38	83,94
Cojinetes axiales	6	2,19	86,13
Bobinado motor	3	8,76	94,89
Diafragma	1	5,11	100
TOTAL	100	100	

Tabla 22. Indisponibilidad provocada por las causas de fallo de un turbocompresor.

Tras recopilar todos los datos necesarios, el siguiente paso será realizar el diagrama de Pareto. Para ello se colocarán en el eje X las causas de fallo ordenadas de izquierda a derecha según su frecuencia. En el eje Y izquierdo se reflejará la frecuencia de cada causa, mientras que en el eje Y derecho se indicará el porcentaje de indisponibilidad acumulado.

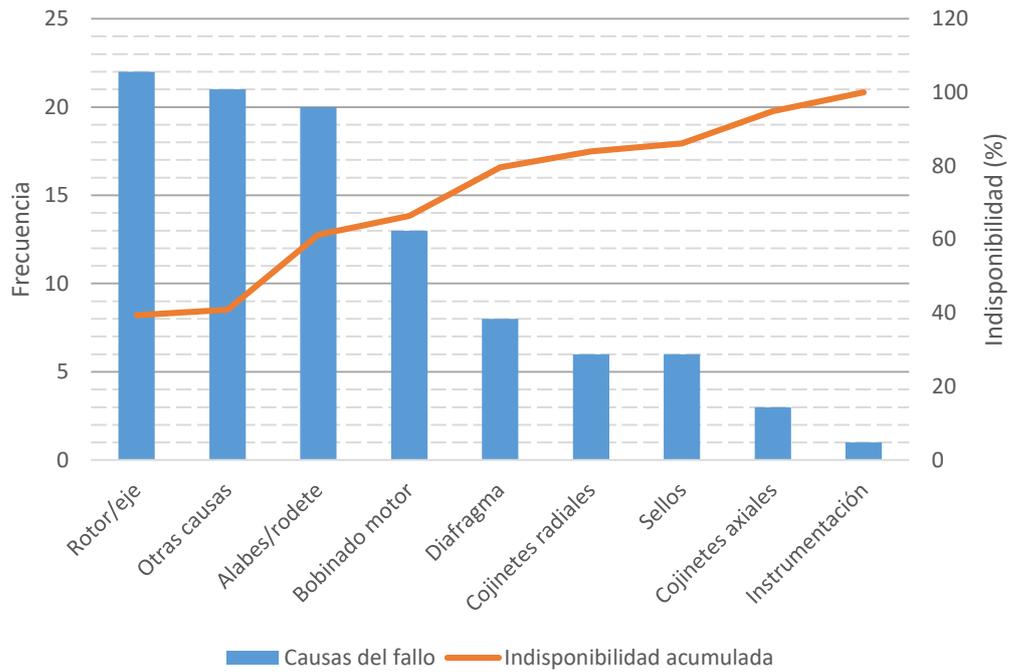


Figura 48. Diagrama de Pareto inicial.

Una vez realizado el primer diagrama, volveremos a ordenar los datos para realizar un segundo diagrama. Esta vez, los datos se ordenarán de mayor a menor en función de la indisponibilidad individual que provoca cada causa de fallo. Al igual que en el caso anterior, incluiremos el porcentaje de indisponibilidad acumulado en la última columna.

Causa del fallo	Frecuencia	Indisponibilidad (%)	% Acumulado
Rotor/eje	22	39,42	39,42
Otras causas	20	20,44	59,86
Alabes/rodete	8	13,14	73
Bobinado motor	3	8,76	81,76
Diafragma	1	5,11	86,87
Cojinetes radiales	13	5,11	91,98
Sellos	6	4,38	96,36
Cojinetes axiales	6	2,19	98,55
Instrumentación	21	1,45	100
TOTAL	100	100	

Tabla 23. Indisponibilidad provocada por las causas de fallo de un turbocompresor (2).

Tras recopilar los datos nuevamente, volveremos a realizar el diagrama de Pareto. Esta vez, se colocarán en el eje X las causas de fallo ordenadas de izquierda a derecha según su porcentaje de indisponibilidad individual. En el eje Y izquierdo se reflejará la frecuencia de cada causa, mientras que en el eje Y derecho se indicará el porcentaje de indisponibilidad acumulado.

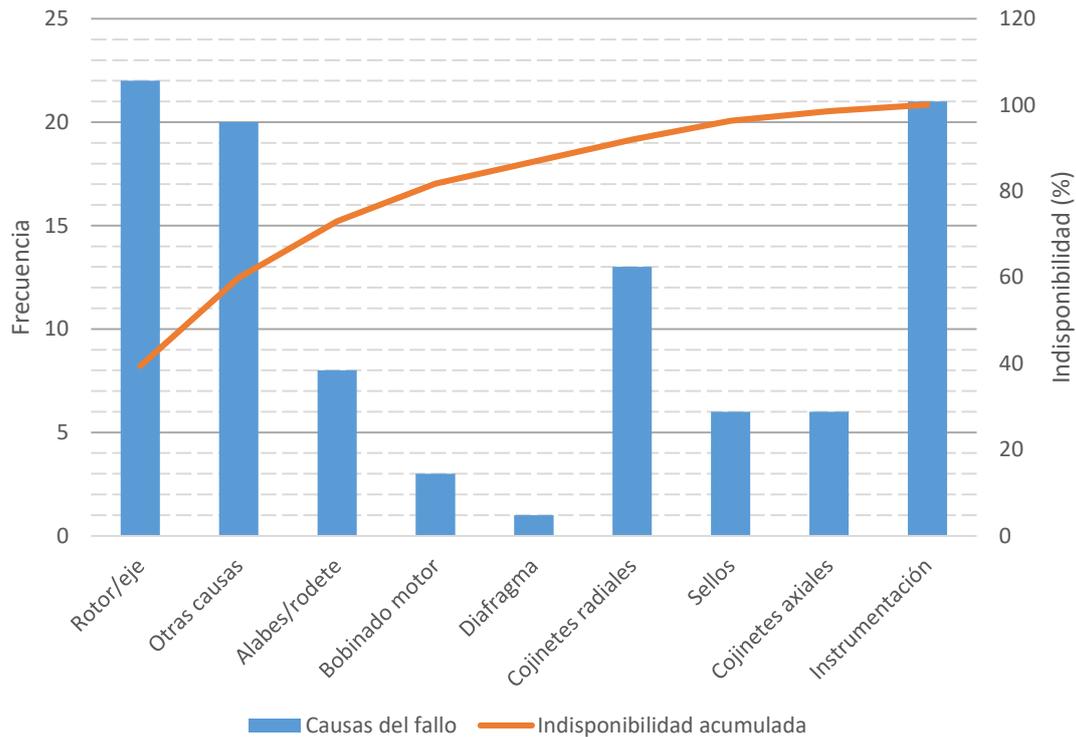


Figura 49. Diagrama de Pareto final.

Tras realizar el diagrama de Pareto podemos apreciar que aproximadamente el 80% de la indisponibilidad del turbocompresor es provocada por cuatro causas: fallos en el rotor o eje, fallos en los álabes o en el rodete, fallos en el bobinado del motor y fallos por causas diversas. También podemos observar que los fallos en instrumentación, a pesar de ser muy frecuentes, apenas tienen repercusión sobre la indisponibilidad del equipo. Por tanto, a la hora de realizar las tareas de mantenimiento habrá que centrarse en las causas que suponen el mayor tiempo de indisponibilidad de la máquina.

6.3. Análisis causa raíz

El análisis causa raíz es una herramienta que nos permite identificar las causas subyacentes de un incidente, de modo que se puedan identificar e implementar las soluciones más efectivas. Normalmente es usado cuando algo va mal, pero también puede usarse cuando todo funciona bien. Dentro de cualquier empresa, la resolución de problemas, la investigación de incidentes y el análisis causa raíz están conectados fundamentalmente por tres preguntas básicas:

- ¿Cuál es el problema?
- ¿Por qué sucedió?
- ¿Qué se hará para evitar que vuelva a suceder?

El análisis causa raíz consiste en excavar debajo de la superficie del problema. Para ayudar a comprender mejor en que consiste el análisis causa raíz emplearemos la siguiente analogía. La maleza de una planta, la parte que está por encima de la superficie, sería el problema que debemos analizar. Al igual que la maleza de una planta, el problema es fácil de ver. Por el contrario, la raíz que está enterrada bajo la superficie y por tanto imposible de ver, constituiría el sistema de causas que han provocado el problema. La raíz está compuesta por

diversos factores que contribuyen a la aparición del problema. Para poder analizar e investigar las causas debemos adentrarnos bajo la superficie.

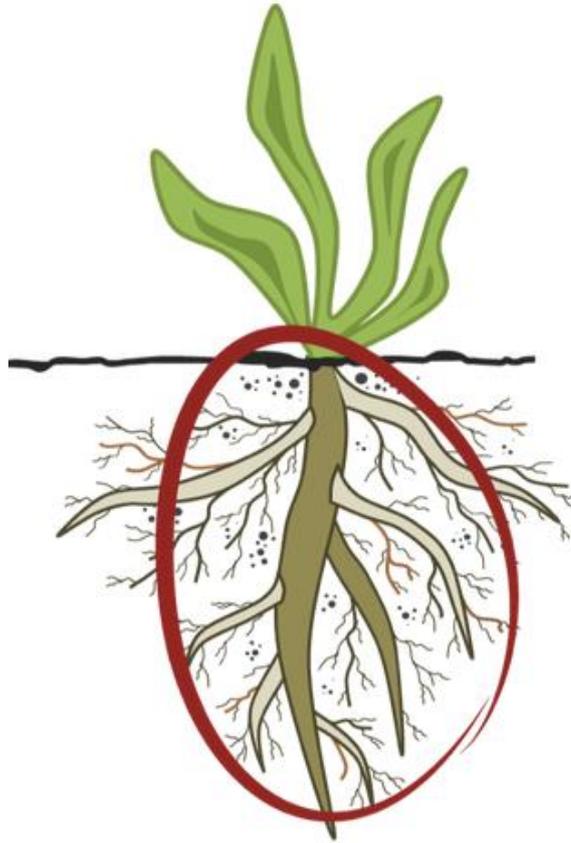
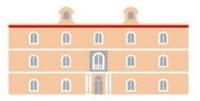


Figura 50. Analogía del análisis causa raíz.

El análisis causa raíz está basado en los siguientes principios:

- Su objetivo principal consiste en identificar las causas que provocaron un problema y establecer una serie de medidas preventivas que eviten la repetición del problema.
- Debe realizarse de forma sistemática y siguiendo una metodología para que resulte efectivo. Se documentarán las evidencias que encuentren.
- Un problema puede ser provocado por más de una única causa.
- Busca prevenir la reaparición del problema al menor coste.
- Es necesario definir correctamente el problema, ya que una mala definición del mismo puede llevarnos a obtener una serie de causas y conclusiones erróneas.
- Establece una secuencia de eventos por medio de relaciones de causa y efecto entre los distintos factores contribuyentes.
- Promueve la transición de una cultura reactiva, que actúa una vez se presenta el problema, a una cultura proactiva, que actúa antes de que se presenten los problemas.

Una manera de representar gráficamente un análisis causa raíz es mediante un árbol de fallos. Se trata de un proceso deductivo que permite establecer relaciones de causa y efecto mediante un diagrama. Su estructura es vertical. Se ubica el problema inicial en la parte superior del diagrama y debajo del mismo se van anotando las causas que lo originan. A continuación se muestra el ejemplo de un árbol de fallo de una bomba centrífuga. El árbol se



ha dividido en varias Figuras a fin de hacer más fácil su interpretación, evitando así hacerlo en una única Figura.



Figura 51. Árbol de fallo - Fallo de la bomba.

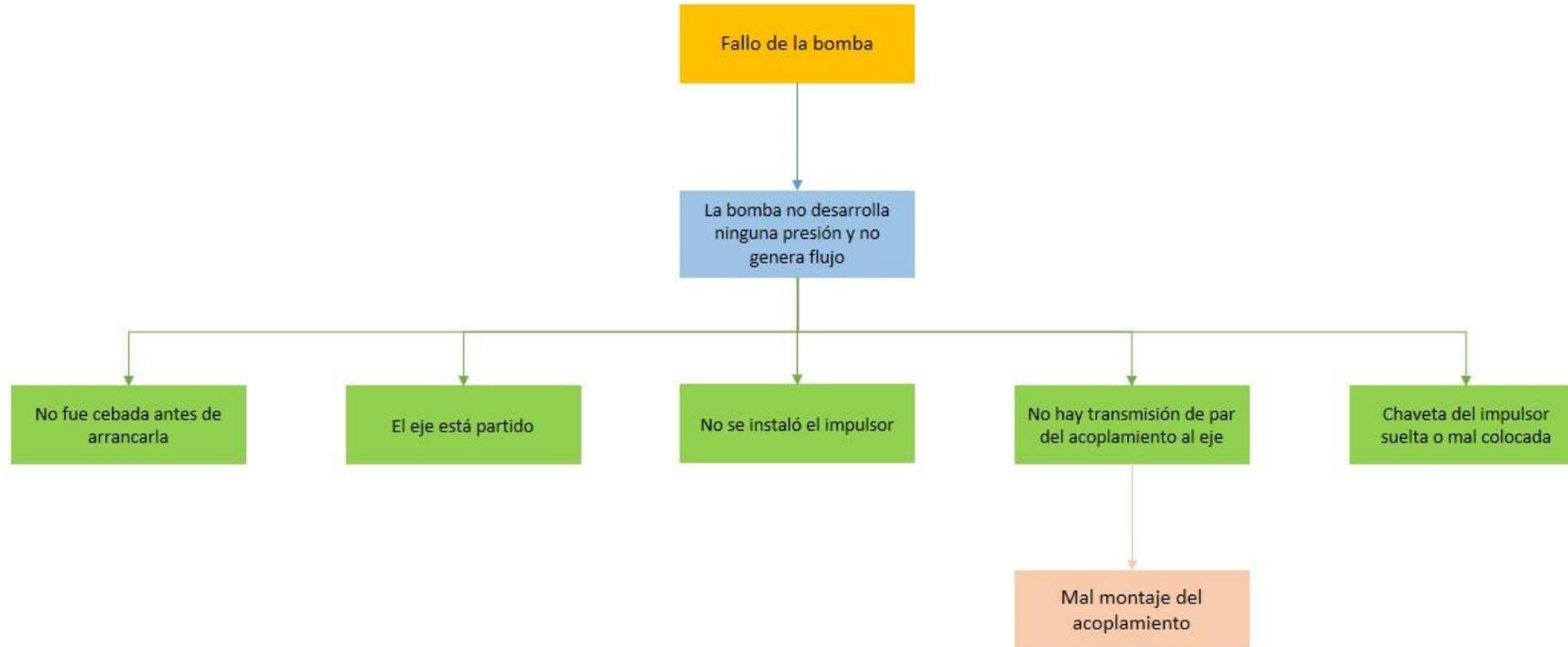


Figura 52. Árbol de fallo - La bomba no desarrolla ninguna presión y no genera flujo.

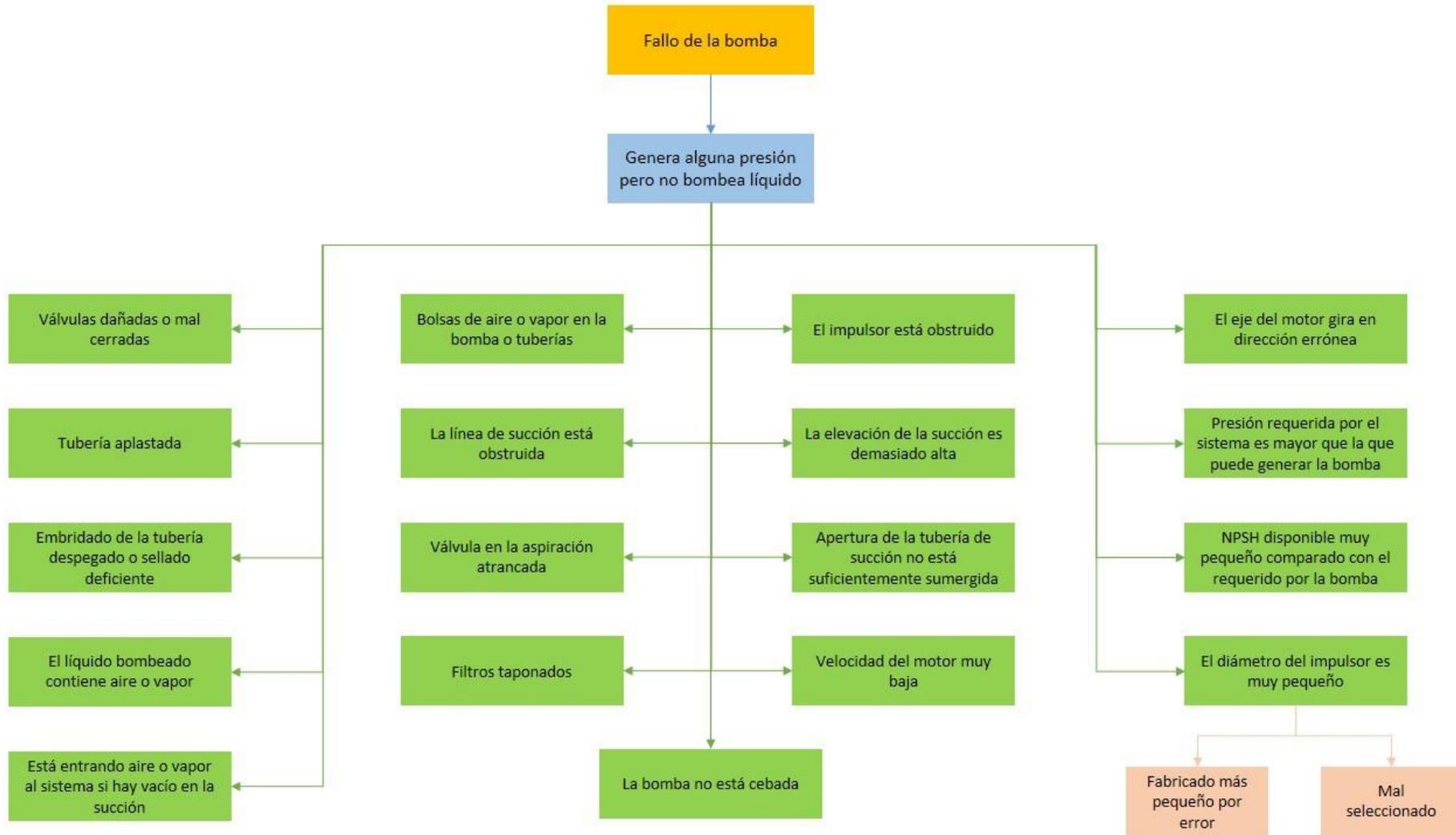


Figura 53. Árbol de fallo - La bomba genera alguna presión pero no bombea líquido.

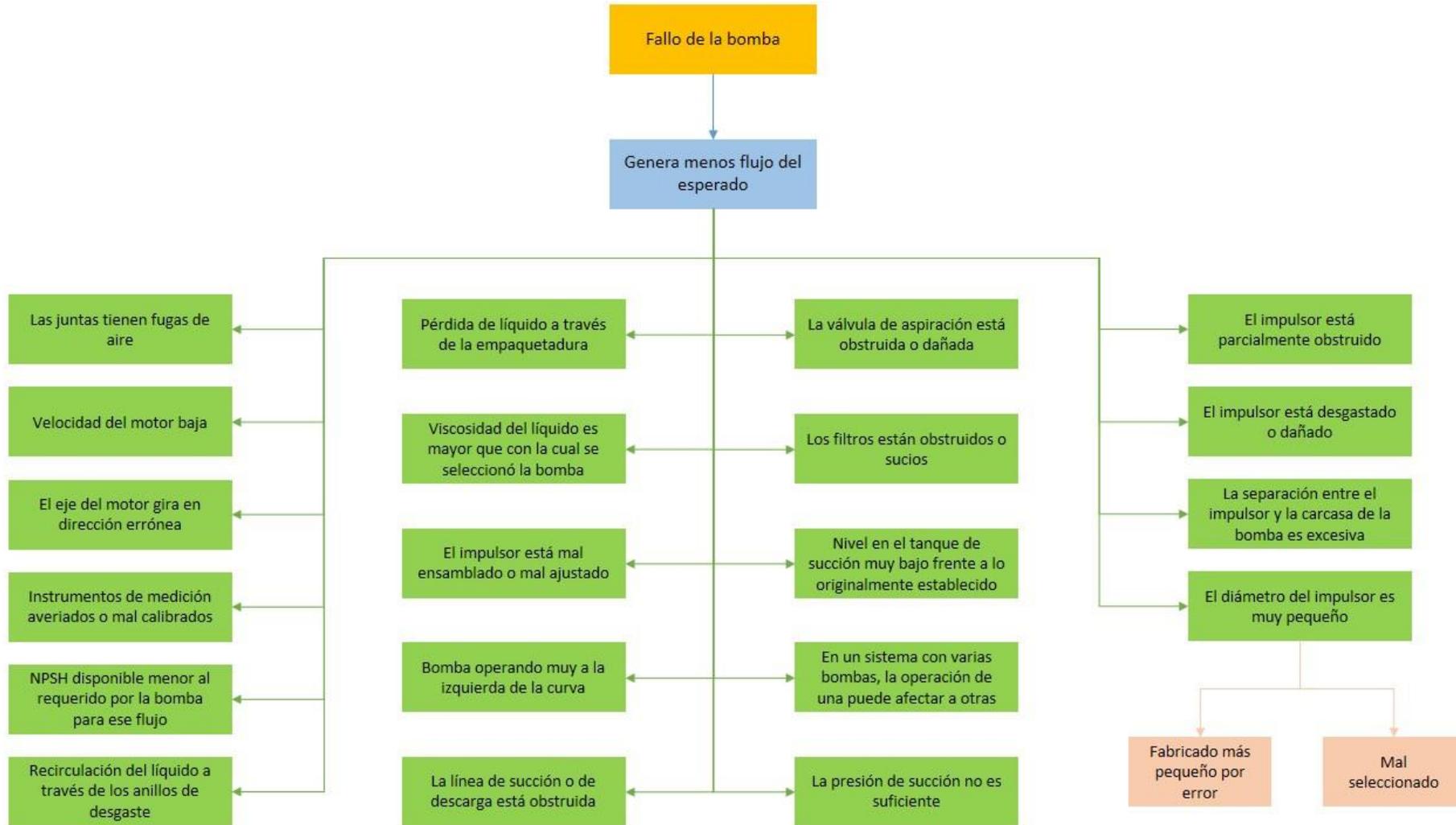


Figura 54. Árbol de fallo - La bomba genera menos flujo del esperado.

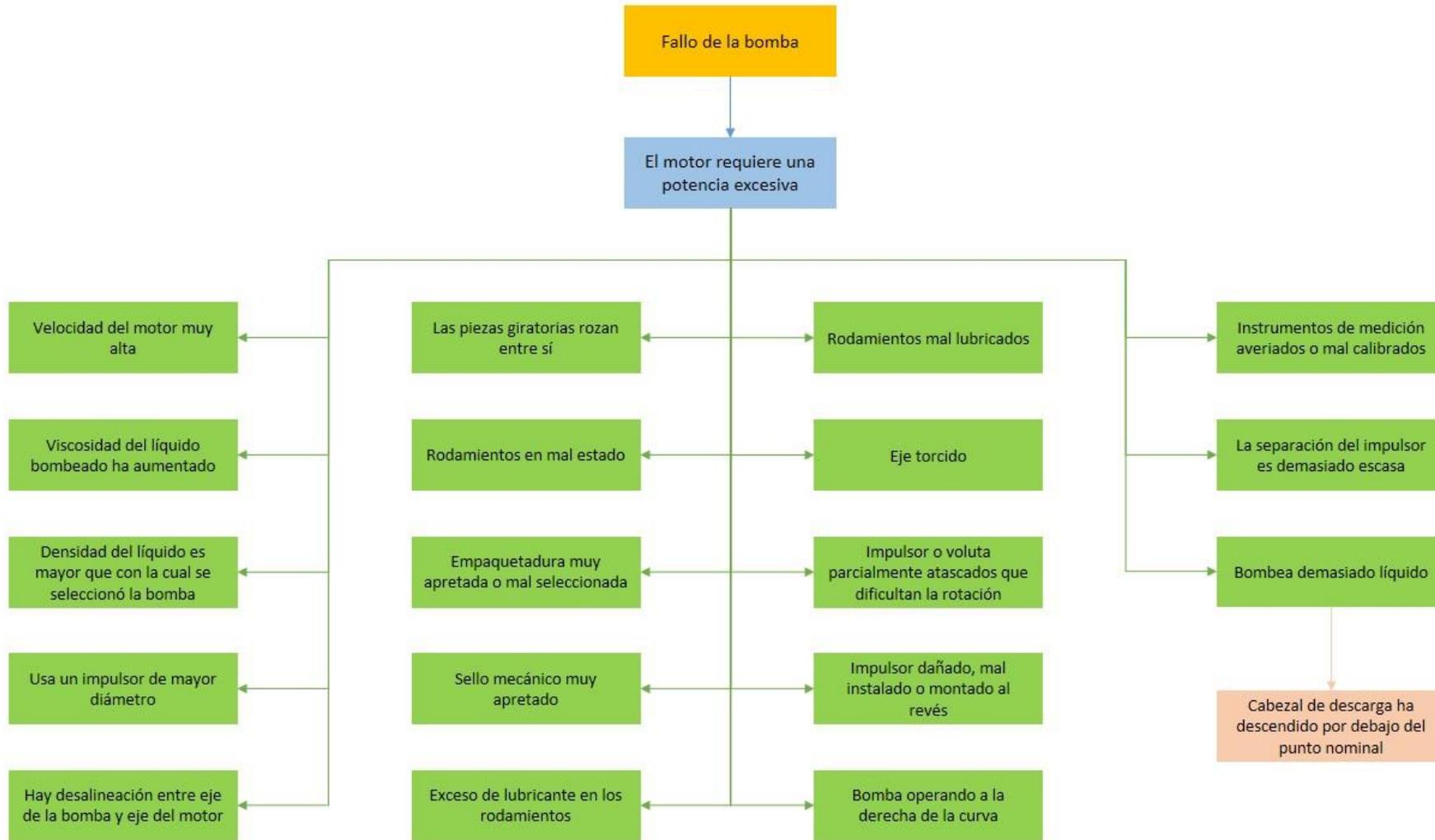


Figura 55. Árbol de fallo - El motor requiere una potencia excesiva.



Figura 56. Árbol de fallo - No funciona bien, pero no se aprecia ningún síntoma extraño.



Figura 57. Árbol de fallo - Funciona bien al principio, pero después para de bombear.

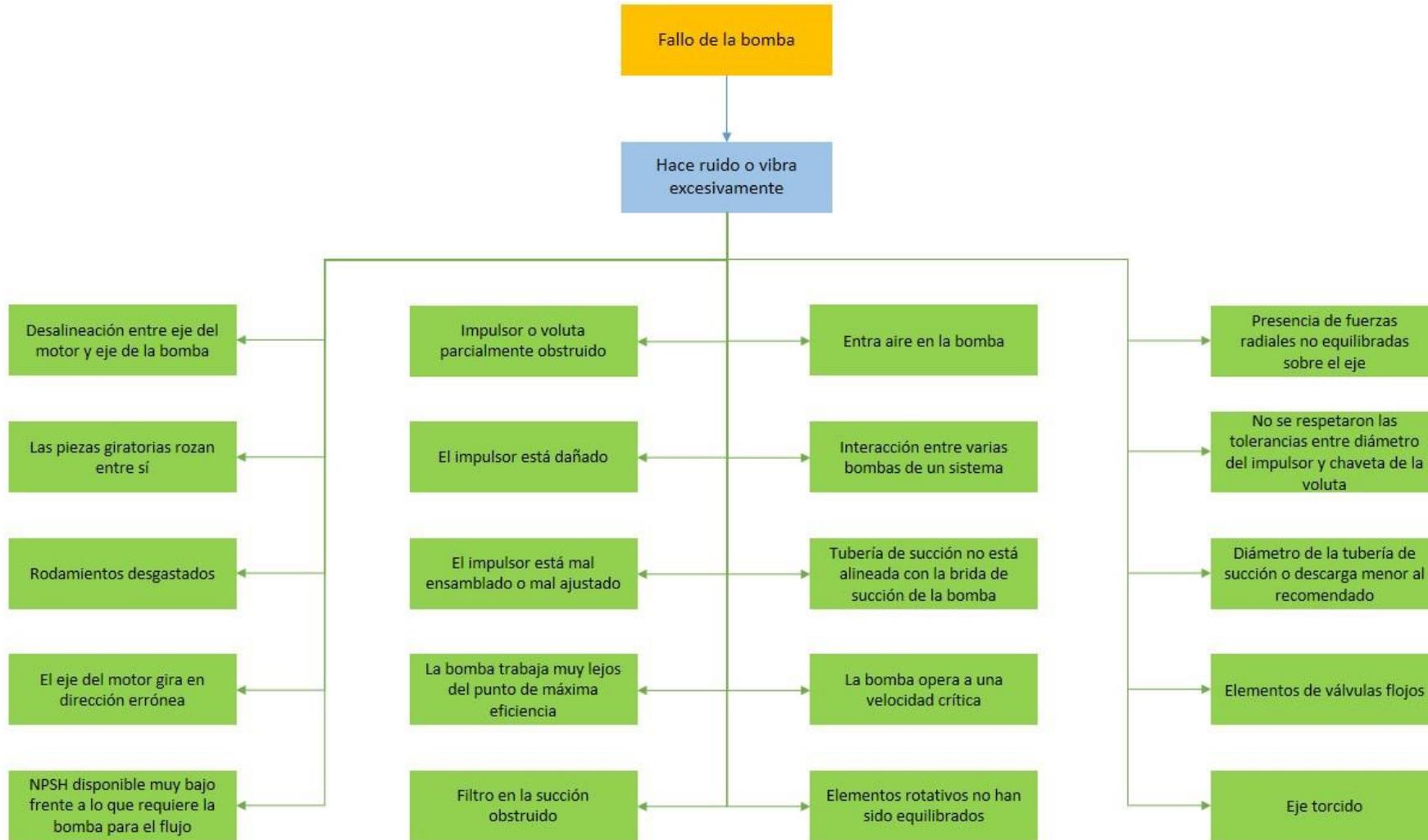


Figura 58. Árbol de fallo - La bomba hace ruido o vibra excesivamente.

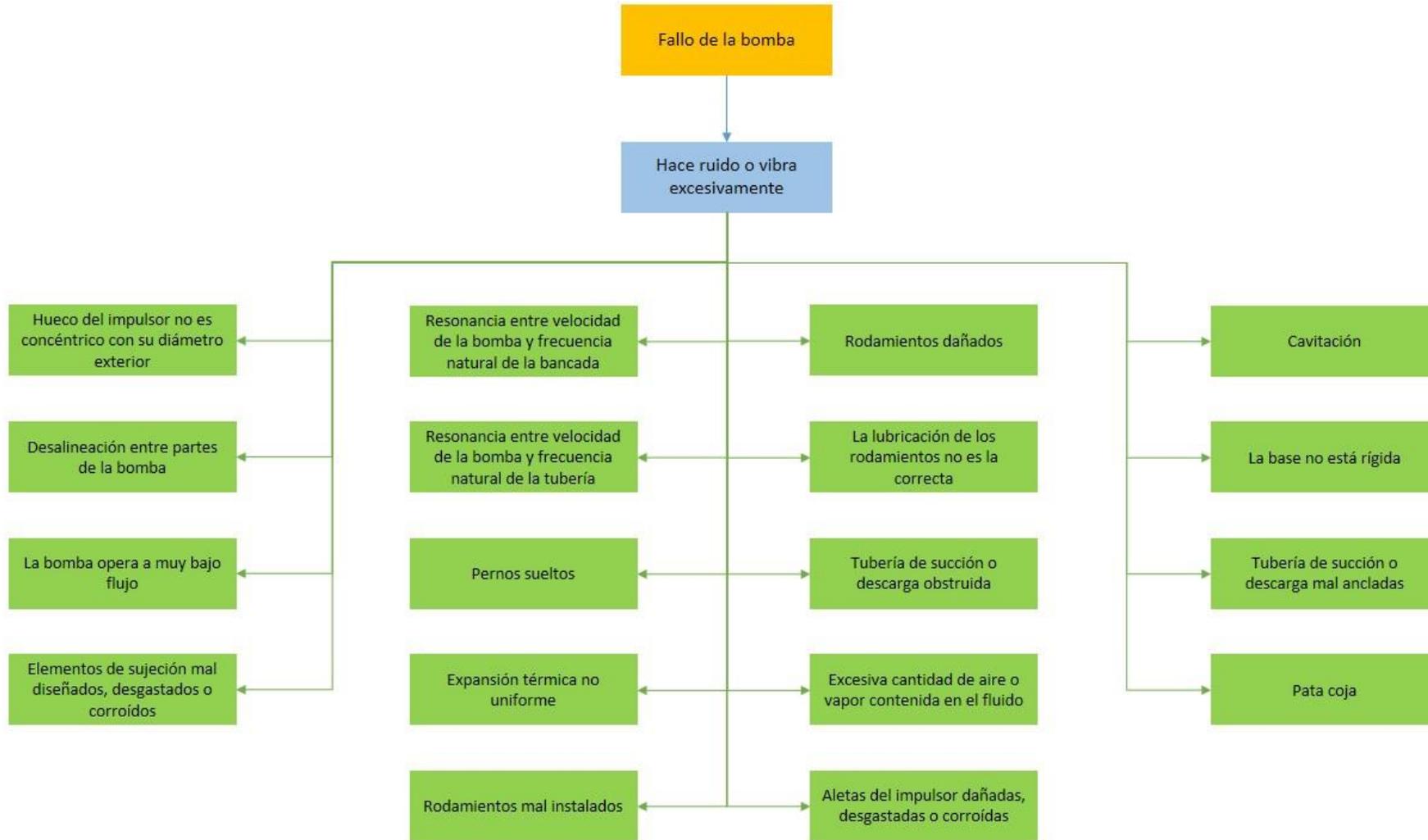


Figura 59. Árbol de fallo - La bomba hace ruido o vibra excesivamente (2).

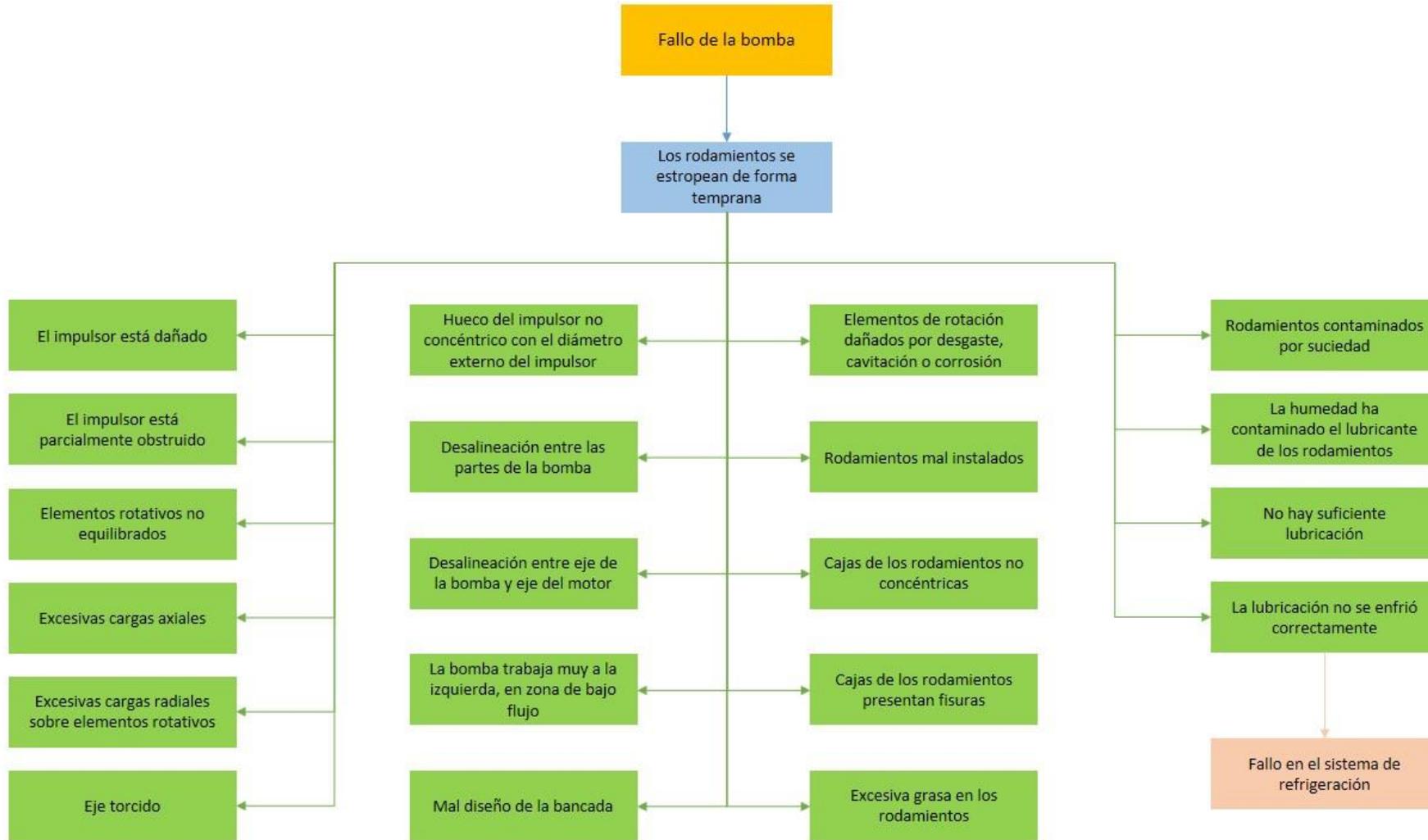


Figura 60. Árbol de fallo - Los rodamientos se estropean de forma temprana.



Figura 61. Árbol de fallo - El sello mecánico tiene fugas excesivas.



6.4. Mapa causal

El mapa causal es un método de análisis causa raíz que mejora la forma en que se analizan, documentan, comunican y resuelven los problemas. En muchas organizaciones y empresas, la resolución de problemas puede ser un laberinto confuso de herramientas, términos y categorías desconcertantes. Por ello, mediante este método se realizan investigaciones que ayuden a aclarar los problemas, no a complicarlos. Un mapa causal presenta un enfoque sencillo, fundamentado en lo básico, de manera que a las personas les resulte fácil de aprender y directo de aplicar. El mapa causal hace uso de unos principios fundamentales para mejorar tanto la efectividad como la eficiencia de la resolución de problemas.

Los tres principios clave en los que se basa son:

- Un enfoque sistémico, que permita revelar un sistema de causas para mitigar el riesgo.
- Aprovechar el poder de la comunicación visual.
- Simple y efectivo, sin alejarse de lo básico.

La metodología utilizada por este método está compuesta de tres pasos:

- Definir el problema por su impacto en los objetivos generales de la empresa. A menudo no se está de acuerdo en cómo definir el problema. Cuando el problema es definido de acuerdo a su impacto en los objetivos generales es más fácil conseguir un consenso.
- Desglosar el problema en un mapa visual. El uso de un mapa causal proporciona una explicación rigurosa que revela todas las causas necesarias para producir el problema.
- Prevenir o mitigar cualquier impacto negativo en los objetivos seleccionando las mejores soluciones. Las soluciones efectivas deben suponer un cambio en cómo se ejecutan los procesos de trabajo.

A la hora de realizar el análisis, un problema claramente definido es un paso importante en el proceso de resolución de problemas. Sin una definición clara del problema, se puede llegar a andar sin rumbo, lo que conlleva una pérdida de tiempo y oportunidades de resolver el problema. El principal inconveniente que puede darse durante la definición de problemas es que cada una de las personas que realizan el análisis tenga una perspectiva diferente de lo que es el problema real. Para evitar que esto ocurra, este método presenta un esquema estructurado que aporta tres beneficios clave para una resolución efectiva de problemas. De este modo, se consigue un problema bien definido desde el principio, lo que ayudará a evitar las dificultades comunes que puedan entorpecer la investigación.

Los tres beneficios principales de un problema bien definido son los siguientes:

- Consenso del personal con respecto al problema.
- Impacto total, con una disminución de los riesgos.
- Orientación sobre el nivel de detalle para el análisis.

El mapa causal proporciona una explicación visual de por qué ha ocurrido un incidente. Conecta las relaciones individuales de causa y efecto para revelar un sistema de causas dentro del problema. El mapa causal puede ser muy básico o extremadamente detallado, dependiendo del problema.

La interpretación del mapa causal es muy sencilla. Se empieza por la izquierda donde aparece el problema a analizar y se lee hacia la derecha preguntándose: “¿Por qué ha ocurrido esto?”. La respuesta a esta pregunta proporciona una o varias causas, las cuales se escriben a continuación. De nuevo, se realiza la pregunta: “¿Por qué ha ocurrido esto?”. De esta manera, las causas que se van convirtiendo en efectos de las causas posteriores. Así, se crea una cadena de eventos mediante la unión de causas y efectos.



Figura 62. Estructura básica de un mapa causal.

Además de las preguntas “¿Por qué?”, las cuales tienden a crear relaciones lineales de causa y efecto, este método también realiza la pregunta: “¿Qué se requirió para producir este efecto?”. Cualquier cosa que se requiere para producir un efecto es causa del mismo. Por tanto, esta pregunta permite construir un mapa causal más detallado que proporciona una representación más completa del problema real. Si un efecto tiene más de una causa, todas ellas se colocan en el mapa causal. Cada una de ellas está conectada al efecto y al resto de causas mediante una conexión “Y”. Estas causas son independientes unas de otras, pero todas son necesarias para producir el efecto.

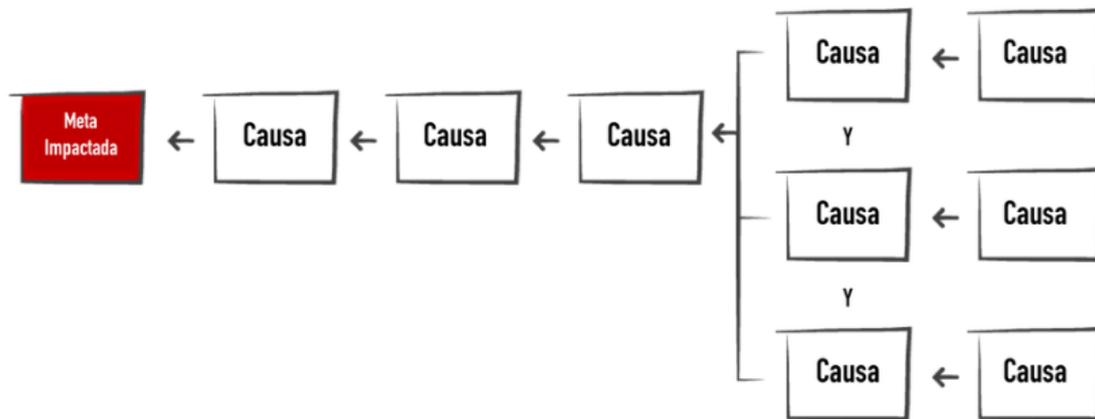


Figura 63. Estructura de un mapa causal con varias causas para un mismo efecto.

El mapa causal está basado en el diagrama de Ishikawa, aunque con algunas diferencias importantes. La principal diferencia es que el diagrama original se lee de derecha a izquierda, porque el idioma japonés se lee en esa dirección. Además, el diagrama de Ishikawa empieza con un solo problema, lo que no refleja la naturaleza de los problemas del mundo real. También mezcla causas y posibles causas sin especificar evidencias, mientras que el mapa causal sí que las refleja. Por último, rompe las relaciones fundamentales de causa y efecto dentro de un problema al agrupar las causas en categorías generales.

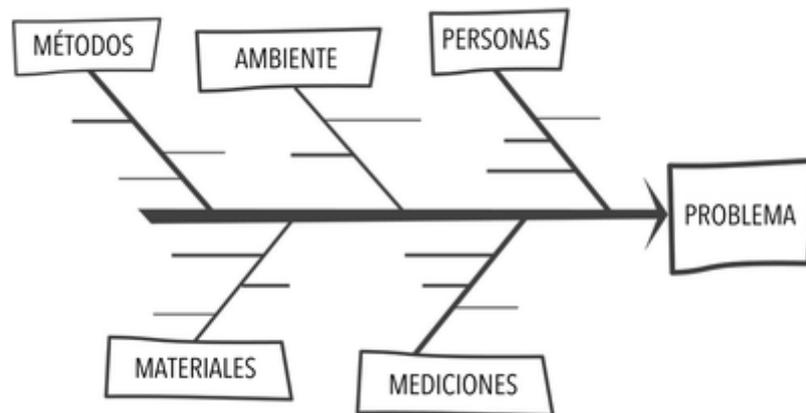


Figura 64. Diagrama de Ishikawa.

Una forma sencilla de empezar una investigación es usar el enfoque de 5 por qué. Se trata de un ejemplo básico de un mapa causal y consiste en plantear el problema o efecto inicial y realizar cinco preguntas de “¿Por qué ha ocurrido esto?”. Este enfoque se suele emplear para problemas sencillos, ya que normalmente con cinco preguntas se puede llegar a la causa real del problema. Sin embargo, existen problemas muy complejos de analizar, por lo que será necesario un mapa causal que comience con cinco “¿Por qué?” y se expanda hasta realizar tantas preguntas como sea necesario. Algunos se refieren a este método como el “5 Por qué con esteroides”.

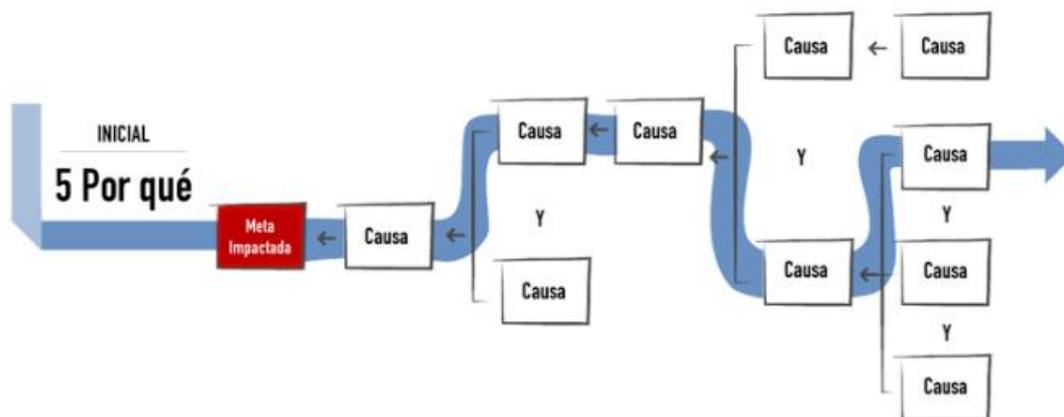


Figura 65. Mapa causal con enfoque de 5 por qué.

6.4.1. Ejemplo de aplicación de un mapa causal

El mapa causal es una herramienta que se utiliza generalmente cuando se presenta un problema y necesitamos encontrar las causas que lo han provocado. Hace unos meses, en una planta desaladora similar a la que se ha descrito aquí, tuvo lugar una parada total de la planta debido a una inundación provocada por la rotura de la tapa de cierre de una tubería. En esta situación, resulta ideal el uso de un mapa causal para intentar determinar el origen que provocó la rotura. Por tanto, se va a elaborar un mapa causal con el objetivo de identificar las causas del problema. La información que se ha utilizado para elaborar el mapa causal se ha

obtenido exclusivamente de publicaciones en medios de comunicación, ya que no se dispone de otro tipo de información acerca de la parada.

El primer paso para realizar un mapa causal consiste en definir el problema principal y recoger en una tabla los impactos que ha provocado sobre los objetivos de la empresa, tal y como se muestra en la Tabla 24.

Problema	Parada total de la planta debido a una inundación
Fecha	Miércoles 27 de Junio de 2018
Localización	Desaladora de Águilas, en Murcia
Impacto en los objetivos:	
Producción	Parada total de la planta
Económico	Costes de mantenimiento, reparación e indisponibilidad
Seguridad	Daños en equipos eléctricos y de bombeo
Consumidores	Municipios sin abastecimiento de agua
Comunidad de regantes	Riesgo de pérdidas de cultivos

Tabla 24. Definición del problema.

Una vez establecidos los impactos que ha provocado el problema, se procede a realizar el mapa causal a partir de estos. Se comienza ubicando los impactos en la parte izquierda del mapa y se van escribiendo las causas que los van provocando a su derecha, como se ha explicado anteriormente. Durante el proceso de elaboración del mapa causal es indispensable aportar todas las evidencias que se posean, a fin de garantizar una mayor fiabilidad en el análisis. Además, en algunos casos se indicarán medidas que pueden adoptarse para solucionar algunas de las posibles causas. Finalmente, se llegan a una serie de causas que apuntan a ser las que han originado el problema. En este caso, encontramos las siguientes:

- La planta operaba por encima de su capacidad nominal.
- Un fallo en el material de la tapa de cierre, bien porque no se ha dimensionado correctamente en base a las condiciones de operación de la planta, o bien porque el material estaba defectuoso.
- Durante la fase de diseño de la instalación no se tuvo en cuenta que podía suceder un incidente de este tipo, no teniendo la precaución de ubicar la sala de bombas a una cota mayor, lo que hubiera evitado la inundación.
- No se previó que pudiera suceder una inundación de este calibre, por lo que las bombas de achique se dimensionaron para evacuar un caudal menor.

Cabe destacar que el problema puede haber sido originado por un conjunto de varias de las causas anteriores, no necesariamente tiene que estar provocado por una sola causa. En la Figura 66 se puede observar el mapa causal realizado.

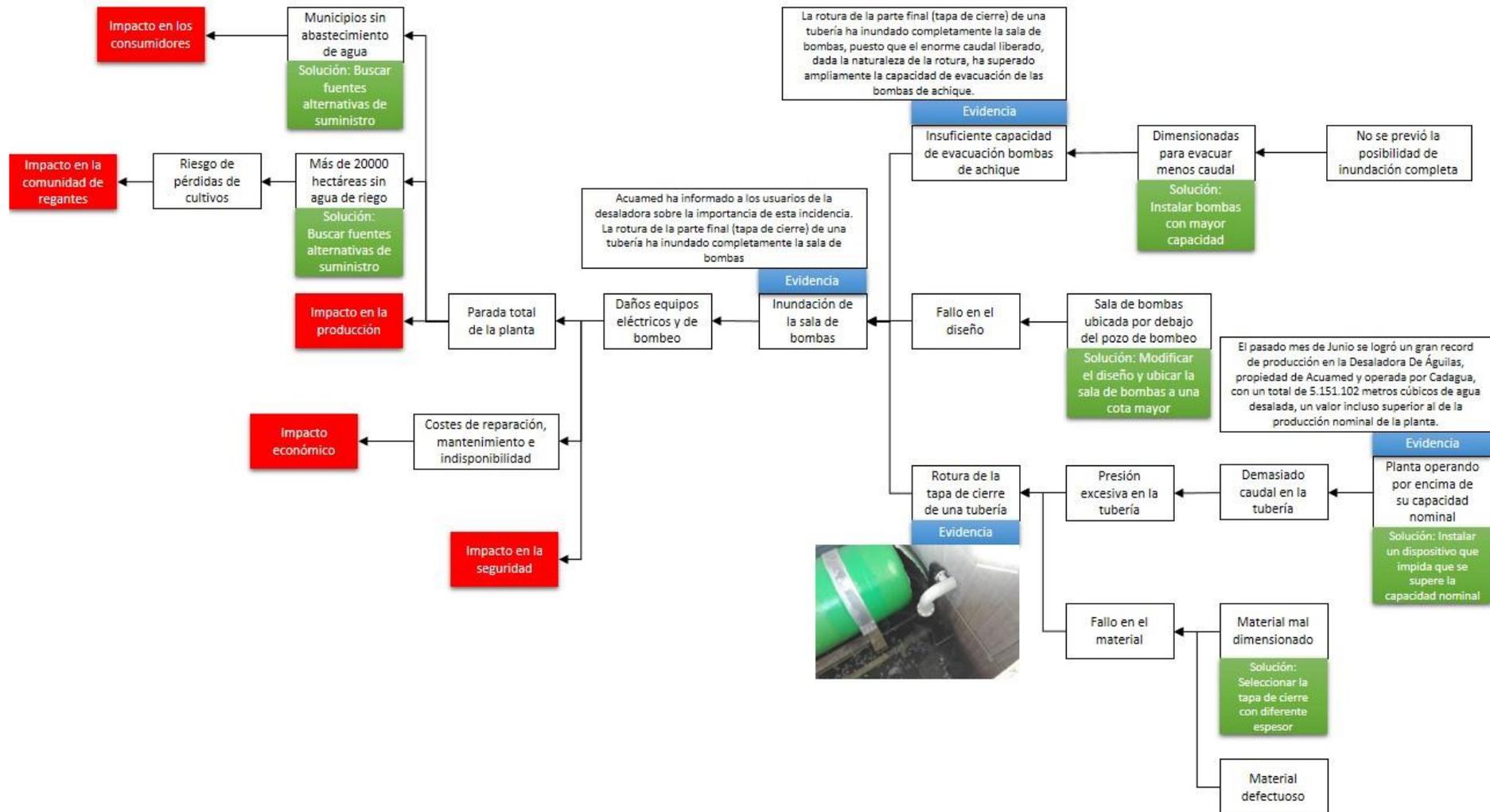


Figura 66. Mapa causal de la parada en la desaladora de Águilas



Capítulo 7

7. CONCLUSIONES

Para alcanzar los objetivos planteados en el Capítulo 1, en primer lugar ha sido necesario realizar la descripción del proceso de funcionamiento de la instalación y de los equipos que intervienen en el mismo. En segundo lugar, a partir de la descripción anterior, se ha realizado un análisis de criticidad, en el cual se han identificado los equipos más críticos que intervienen en el proceso. La finalidad de dicho análisis es destinar adecuadamente los recursos de mantenimiento sobre aquellos equipos de mayor importancia en el proceso productivo.

En tercer lugar, se han planificado las tareas de mantenimiento a aplicar a cada uno de los equipos, en base al análisis de criticidad. Se han detallado las técnicas predictivas, se han definido las gamas de mantenimiento preventivo y se ha descrito el proceso de gestión del mantenimiento correctivo.

Por último, se han presentado tres herramientas de análisis para evaluar la gestión del mantenimiento planificado y se ha demostrado su utilidad mediante una serie de ejemplos. En particular, el diagrama de Pareto resulta de gran utilidad a la hora de optimizar los recursos disponibles y minimizar los costes, ya que ayuda a identificar los elementos que originan alta indisponibilidad de los equipos y elevados costes de mantenimiento. El árbol de fallo permite visualizar de una manera clara las relaciones de causa y efecto entre los distintos factores contribuyentes. Por otra parte, el mapa causal ha demostrado ser de utilidad para analizar los incidentes que hayan ocurrido, ya que ayuda detectar las posibles causas que han provocado el incidente y propone una serie de soluciones o medidas para evitar que vuelva a suceder.



BIBLIOGRAFÍA

BENITO DE BENITO, M.; CARBALLO LAFUENTE, M.; OTERO ROMERO, A.; RUIZ ÁLVAREZ, M. (2010). *Diseño de una desaladora de agua de mar de 60.000 m³/día con pretratamiento de ultrafiltración*. (Proyecto Fin de Máster). Escuela de organización industrial, Madrid.

GARCÍA GARRIDO, S. (2007). *Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado*. Díaz de Santos.

GÓMEZ DE LEÓN, F.C. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia, Murcia.

PÉREZ GONZÁLEZ, A.; RODRÍGUEZ CERVANTES, J.; SÁNCHEZ MARÍN, F.; SANCHO BRU, J. (2007). *Mantenimiento mecánico de máquinas*. Universitat Jaume I, Castellón.

PILA ALONSO, A. (2012). *Estudio para implantar nuevos métodos de gestión en mantenimiento ferroviario*. (Proyecto Fin de Carrera). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

RODRÍGUEZ MARTÍN, S. (2016). *Ingeniería básica de planta desaladora de agua de mar de 40.000 m³/día de capacidad*. (Trabajo Fin de Grado). Universidad de Sevilla, Sevilla.

Enlaces:

<https://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>

https://www.lenntech.com/processes/desalination/general/desalination-key-issue.htm?gclid=EAlaIQobChMI2NKcubTu2wIVB_hRCh2SzAmJEAAYASAAEgJUKPD_BwE

<http://drintec.com/documentos/general/Lechos-de-calcita-Drintec-folleto.pdf>

<https://tecfluid.com/caudalímetros-electromagnéticos-en-línea-o-inserción/>

https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-redox-kat_70144.htm

<http://www.aldakin.com/tipos-de-mantenimiento-industrial-ventajas-inconvenientes/>

<https://www.monografias.com/trabajos101/el-mantenimiento-industrial/el-mantenimiento-industrial.shtml>

<http://noria.mx/lublearn/como-los-instrumentos-dielectricos-pueden-ayudar-al-analisis-de-aceite/>

<https://ingenieromarinero.com/analisis-de-lubricantes-deteccion-de-particulas-metalicas/>

http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Contaje_de_part%C3%ADculas_ES.pdf

<https://studylib.es/doc/7517183/vibraciones-en-m%C3%A1quinas.-mantenimiento-predictivo>

<https://power-mi.com/es/content/holguras>

<http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/medidor-de-espesor-por-ultrasonido>



http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/ciencias_t8.3_liq_penetrantes.pdf

<http://www.mailxmail.com/curso-mantenimiento-industrial-2-3/mantenimiento-predictivo-inspecciones-1-2>

https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_ES.pdf

https://www.gouldspumps.com/ittgp/medialibrary/goulds/website/Literature/Instruction%20and%20Operation%20Manuals/Numerical/3700_IOM_Spanish.pdf?ext=.pdf

https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n_de_mantenimiento_asistido_por_computadora

<https://selecthub.com/cmms/difference-eam-cmms/>

<https://leanmanufacturing10.com/diagrama-de-pareto>

<https://www.thinkreliability.com/cause-mapping/>

<https://www.laverdad.es/murcia/grave-rotura-desaladora-20180627151540-nt.html>

<https://cadagua.es/2017/07/18/record-de-produccion-en-la-desaladora-de-aguilas/>