Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Identificación y propuestas de solución de eventos comunes y anómalos ocurridos durante las fases de Puesta en Marcha, Operación Normal y Mantenimiento de una Planta Desaladora de Agua de Mar

Para obtener el título profesional de:
Ingeniero Sanitario

Elaborado por
Juan Augusto Torres Vilchez

0009-0001-9580-0099

Asesor
MSc. Victor Antonio Maldonado Yactayo

0009-0006-2144-063X

LIMA – PERÚ
2024

Citar/How to cite	Torres Vilchez [1]
Referencia/Reference Estilo/Style: IEEE (2020)	[1] J. Torres Vilchez, "*Identificación y propuestas de solución de eventos comunes y anómalos ocurridos durante las fases de Puesta en Marcha, Operación Normal y Mantenimiento de una Planta Desaladora de Agua de Mar* " [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.

Citar/How to cite	(Torres, 2024)
Referencia/Reference Estilo/Style: APA (7ma ed.)	Torres, J. (2024). *Identificación y propuestas de solución de eventos comunes y anómalos ocurridos durante las fases de Puesta en Marcha, Operación Normal y Mantenimiento de una Planta Desaladora de Agua de Mar*. [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Dedicatoria

Dedicado a mis padres Taine y Maruja, por su apoyo en este largo camino, su esfuerzo, confianza y consejos, a ustedes todos mis logros.

Agradecimientos

Dar gracias a mi padre, Taine Torres por su apoyo desde el primer día en que me incliné por mi profesión y por siempre confiar en que lo lograría, ahora que ya no está con nosotros sé que se sentiría orgulloso de mí. Gracias a mi madre, Maruja Vilchez por estar conmigo día a día en una ciudad desconocida y apoyarme incondicionalmente a alcanzar mis metas.

A mis tíos Filomena, Ángel y Marino, quienes a pesar de la distancia siempre estuvieron conmigo en todo momento con su apoyo y consejos.

A Victor, mi jefe y compañero de trabajo, por la confianza y los conocimientos brindados con toda su experiencia, los mismos que me permitieron formarme como un mejor profesional cada día y desarrollarme en nuevas áreas de mi carrera.

Al Ing. Victor Maldonado, por su apoyo constante en la realización de este trabajo a pesar de las dificultades.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, por los conocimientos impartidos, y el honor de pertenecer a esta gran casa de estudios.

Resumen

El presente trabajo reúne los eventos más relevantes ocurridos durante las fases de puesta en marcha y operación de una planta desalinizadora de agua de mar cuyo producto final es el agua potable. Asimismo, se describe el funcionamiento de este tipo de plantas identificando los procesos de tratamiento tales como: Flotación de por Aire Disuelto (DAF), Filtros Malla Autolimpiantes, Ultrafiltración, Filtros Cartucho, Ósmosis Inversa, Remineralización por Lechos de Calcita y Desinfección con Hipoclorito de Sodio.

Además, poder entender el funcionamiento y llevar un control operativo en este tipo de plantas se definen también parámetros operativos propios de una planta desalinizadora destacando los parámetros de Conductividad Eléctrica, Presión Transmembránica, Permeabilidad a 20°C, Potencial Redox y Porcentajes de Recuperación, entre otros.

En este trabajo, se han identificado problemas como caídas de presión ocasionadas por: fallas durante los ciclos de lavado de los bastidores de ultrafiltración, fallas en la apertura y cierre de válvulas automáticas, mala hermeticidad de válvulas y contaminación de líneas de aire seco para instrumentación. Por otro lado, debido a la programación del sistema SCADA respecto a la validación de funcionamiento de un proceso previo para la activación del siguiente proceso, se han identificado problemas en la operación detectados por el sistema SCADA originados por: falla en encendido de equipos, falla por mala configuración de parámetros eléctricos y parada de planta por elevación del potencial redox.

Asimismo, también se identificaron problemas operativos como: disminución del permeado a 20°C, elevación del diferencial de presión, ensuciamiento de membranas por limpiezas de mantenimiento, saturación de membranas de ósmosis inversa y ensuciamiento por calcitas.

Finalmente, en este trabajo se llega a la conclusión que es de suma importancia la ejecución de los mantenimientos preventivos y controles operativos de manera eficiente y en el tiempo

adecuado, de tal forma que nos permita poder prever los problemas operativos e identificarlos a tiempo.

Las soluciones y controles operativos propuestos se basan en la experiencia adquirida como responsable de la operación y mantenimiento de la planta desalinizadora de agua de mar ubicada al sur de la ciudad de Lima y de la información obtenida y recolectada durante los primeros 4 años de producción y abastecimiento continuo a la población.

Asimismo, se busca colocar como línea de referencia para las futuras plantas de agua potable a base de la desalinización del agua de mar que se desarrollarán en el país.

Abstract

This work brings together the most relevant events that occurred during the start-up and operation phases of a seawater desalination plant whose final product is drinking water. Likewise, the operation of this type of plants is described, identifying the treatment processes such as: Dissolved Air Flotation (DAF), Self-cleaning Mesh Filters, Ultrafiltration, Cartridge Filters, Reverse Osmosis, Remineralization and Disinfection with Hypochlorite Sodium.

In addition, to understand the operation and maintain operational control in this type of plants, operating parameters specific to a desalination plant are also defined, highlighting the parameters of Electrical Conductivity, Transmembrane Pressure, Permeability at 20°C, Redox Potential and Recovery Percentages, among others.

In this work, drop problems have been identified such as pressures caused by: failures during the washing cycles of the ultrafiltration racks, failures in the opening and closing of automatic valves, poor valve tightness and contamination of dry air lines for instrumentation. On the other hand, due to the programming of the SCADA system regarding the validation of the operation of a previous process for the activation of the next process, problems have been identified in the operation detected by the SCADA system caused by: failure to turn on equipment, failure due to poor configuration of electrical parameters and plant shutdown due to elevation of the redox potential.

Likewise, operational problems are also identified such as: decrease in permeate at 20°C, increase in pressure differential, fouling in membranes due to maintenance cleaning, saturation of reverse osmosis membranes and fouling by calcites.

Finally, in this work we reach the conclusion that it is of utmost importance to execute preventive maintenance and operational controls efficiently and in the appropriate time, in such a way that it allows us to foresee operational problems and identify them in time.

The proposed solutions and operational controls are based on the experience acquired as responsible for the operation and maintenance of the seawater desalination plant located south of the city of Lima and on the information obtained and collected during the first 4 years of production and continuous supply to the population.

In addition, it seeks to place it as a reference line for future drinking water plants based on seawater desalination that will be developed in the country.

Tabla de Contenido

Dedicatoria ……III
Agradecimientos ……IV
Resumen …….. V
Abstract …….. VII
Tabla de Contenido …… IX
Lista de Tablas ……..XII
Lista de Figuras …… XIII
Capítulo I. Introducción 1
1.1. Generalidades 1
1.2. Problemática 3
1.3. Objetivos 5
1.3.1. Objetivos Generales 5
1.3.2. Objetivos Específicos 5
Capítulo II. Fundamento Teórico 6
2.1. Desalinización: Conceptos y tecnologías 6
2.1.1. Concepto 6
2.2. Técnicas de Desalinización 8
2.3. Principales métodos de desalinización 10
2.3.1. Evaporación por Efecto Múltiple (MED) 10
2.3.2. Evaporación súbita por efecto flash (MSF) 11
2.3.3. Electrodiálisis 12
2.3.4. Ósmosis Inversa 13
2.4. Unidades de Tratamiento recomendadas para la Desalación de Agua de Mar 16
2.4.1. Pretratamiento 16
2.4.2. Ósmosis Inversa 20
2.4.3. Remineralización 25
2.4.4. Desinfección 26
2.5. Sistemas de Limpieza para Ultrafiltración y Ósmosis Inversa 27
2.6. Principales contaminantes de membranas 28
2.6.1. Precipitaciones de Carbonato de Calcio 28
2.6.2. Precipitaciones de Sulfato de Calcio, Bario y Estroncio 29
2.6.3. Óxidos metálicos e hidróxidos 29
2.6.4. Revestimiento de sílice polimerizado 29
2.6.5. Contaminantes coloidales 30

2.6.6. Contaminantes de materia orgánica natural disuelta 30
2.6.7. Depósitos microbiológicos 30
Capítulo III. Principales parámetros de control operativo en una planta desaladora de agua de mar 31
3.1. Turbidez 31
3.2. Conductividad Eléctrica 32
3.3. Presión Transmembránica (Ultrafiltración). 34
3.4. Flujo de Permeado o Flujo Filtrado 35
3.5. Permeabilidad a 20°C 36
3.6. Índice de Ensuciamiento (SDI). 38
3.7. Potencial REDOX. 38
3.8. Porcentaje de Recuperación 39
3.9. Caudal de Rechazo y Caudal Permeado. 40
3.10. Presiones del Sistema de Ósmosis Inversa 41
3.11. Normalización (Ósmosis Inversa). 42
3.12. Estabilización de la Planta Desaladora. 43
Capítulo IV. Condiciones de operación de la planta desalinizadora de agua de mar referenciada en este trabajo 46
4.1. Definiciones previas 47
4.1.1. Fase de puesta en marcha 47
4.1.2. Parada de planta 48
4.1.3. Arranque de planta 48
4.2. Pretratamiento 48
4.2.1. Flotación por Aire Disuelto (DAF) 48
4.2.2. Cámara de Agua Clarificada y Bombeo de Agua Clarificada 50
4.2.3. Filtros Malla Autolimpiantes 50
4.2.4. Ultrafiltración 51
4.2.5. Filtros Cartucho 54
4.3. Ósmosis Inversa 56
4.4. Postratamiento 58
4.4.1. Lechos de Calcita 59
4.4.2. Desinfección 59
4.5. Unidades de Proceso Complementarias 60
4.5.1. Tanque de Retrolavado y Limpiezas de Recuperación - Ultrafiltración 60
4.5.2. Tanque de Lavado de Membranas de Ósmosis Inversa 63
4.6. Arranque de Planta: Secuencia de Encendido de Equipos y Unidades de la Planta Desalinizadora 66

Capítulo V. Principales problemas/eventos ocurridos durante la puesta en marcha y operación - propuesta de soluciones operativas 70
5.1. Ciclos de lavado - Tiempos de apertura y cierre de válvulas 70
5.2. Sincronización de presiones y caudales 71
5.3. Falla en el encendido de válvulas y equipos - Señales de retroaviso. 74
5.4. Configuración de parámetros de encendido en equipos 75
5.5. Corrosión. 75
5.6. Llaves térmicas y guardamotores 76
5.7. Configuraciones de parámetros eléctricos 77
5.8. Hermeticidad de válvulas. 78
5.9. Presurización de líneas de aire seco para válvulas neumáticas. 80
5.10. Ensuciamiento de membranas por limpiezas de mantenimiento 80
5.11. Saturación de membranas de ósmosis inversa 82
5.12. Elevación del potencial Redox luego de limpiezas. 85
5.13. Disminución del Permeado a 20°C. 87
5.14. Elevación del diferencial de Presión. 87
5.15. Ensuciamiento por calcitas 88
Capítulo VI. Cuadro resumen de los problemas operativos vs soluciones recomendadas. 89
Capítulo VII. Actividades de mantenimiento recomendadas de equipos y unidades de tratamiento principales 92
Capítulo VIII. ..... Conclusiones 98
Capítulo IX. Recomendaciones 99
Capítulo X. Referencias 101

Lista de Tablas

Tabla 1. Disponibilidad Hídrica vs. Hab. en el Perú según las Vertientes en 2020 3
Tabla 2. Valores de conductividad eléctrica en playas de Puerto Chico y Chorrillos. 6
Tabla 3. Tipos de tecnologías aplicadas para la desalinización del agua 8
Tabla 4. Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos 9
Tabla 5. Rechazo de sales y permeabilidad según el tipo de material de membrana 25
Tabla 6. Rangos de turbidez típicos por etapa de tratamiento en una planta desalinizadora 32
Tabla 7. Valores de conductividad típicos de la planta desalinizadora según la etapa de tratamiento en el sistema de ósmosis inversa 33
Tabla 8. Horas de funcionamiento vs Conductividad eléctrica producida 44
Tabla 9. Productos Químicos de Limpiezas de Recuperación Recomendados 61
Tabla 10. Recetas de soluciones de limpieza recomendadas por el fabricante. 64
Tabla 11. Soluciones de limpieza recomendadas según el tipo de contaminante 65
Tabla 12. Principales problemas operativos 89
Tabla 13. Compuertas Motorizadas 92
Tabla 14. Bombas Sumergibles 93
Tabla 15. Válvulas 93
Tabla 16. Compresores 93
Tabla 17. Skid o Armarios de Dosificación 94
Tabla 18. Bombas Centrifugas 94
Tabla 19. Bastidor de Membranas de Ultrafiltración 95
Tabla 20. Bastidor de membranas de ósmosis inversa 95
Tabla 21. Sistema de Recuperadores de Energía (ERI) 96
Tabla 22. Lechos de Calcita 96
Tabla 23. Tableros Eléctricos 96
Tabla 24. Instrumentación 97

Lista de Figuras

Figura 1. Comparativa de la evolución de la capacidad instalada de producción de agua desalada entre membranas de ósmosis inversa y procesos térmicos. 2
Figura 2. Esquema de acuífero en contacto con el mar. Identificación de las tres fases: Agua dulce, Agua Salobre y Agua de Mar. 7
Figura 3. Destilación múltiple efecto con evaporadores horizontales 11
Figura 4. Esquema de una planta con sistemas MSF 12
Figura 5. Proceso de Electrodiálisis 13
Figura 6. Proceso de ósmosis directa 14
Figura 7. Proceso de ósmosis inversa 14
Figura 8. Esquema de los procesos de una planta desaladora por ósmosis inversa 16
Figura 9. Esquema gráfico de un sistema DAF 17
Figura 10. Sistema de separación de membranas 18
Figura 11. Clasificación de membranas 19
Figura 12. Difusión de dos soluciones con concentraciones diferentes 20
Figura 13. Proceso de ósmosis directa 21
Figura 14. Proceso de ósmosis inversa 22
Figura 15. Gráfica de Horas de funcionamiento vs Conductividad 45
Figura 16. Diagrama de Flujo de Procesos de Tratamiento en la Planta Desalinizadora 47
Figura 17. Pretratamiento – Sistema DAF 49
Figura 18. Filtro Malla Autolimpiante 51
Figura 19. Bastidores de Membranas de Ultrafiltración 54
Figura 20. Filtro Cartucho: Estructura y cartuchos internos 55
Figura 21. Sistema de Ósmosis Inversa 58
Figura 22. Lechos de Calcita – Tubos difusores interiores 59
Figura 23. Tanque de Retrolavado para Limpiezas Químicas 62
Figura 24. Tanque de Lavado de Membranas de Ósmosis Inversa – Limpiezas CIP 66

Capítulo I. Introducción

1.1. Generalidades

El tratamiento de agua de mar como fuente de agua potable para consumo humano mediante Ósmosis Inversa, es una tecnología relativamente moderna la cual viene desarrollándose en los últimos años en este lado del continente.

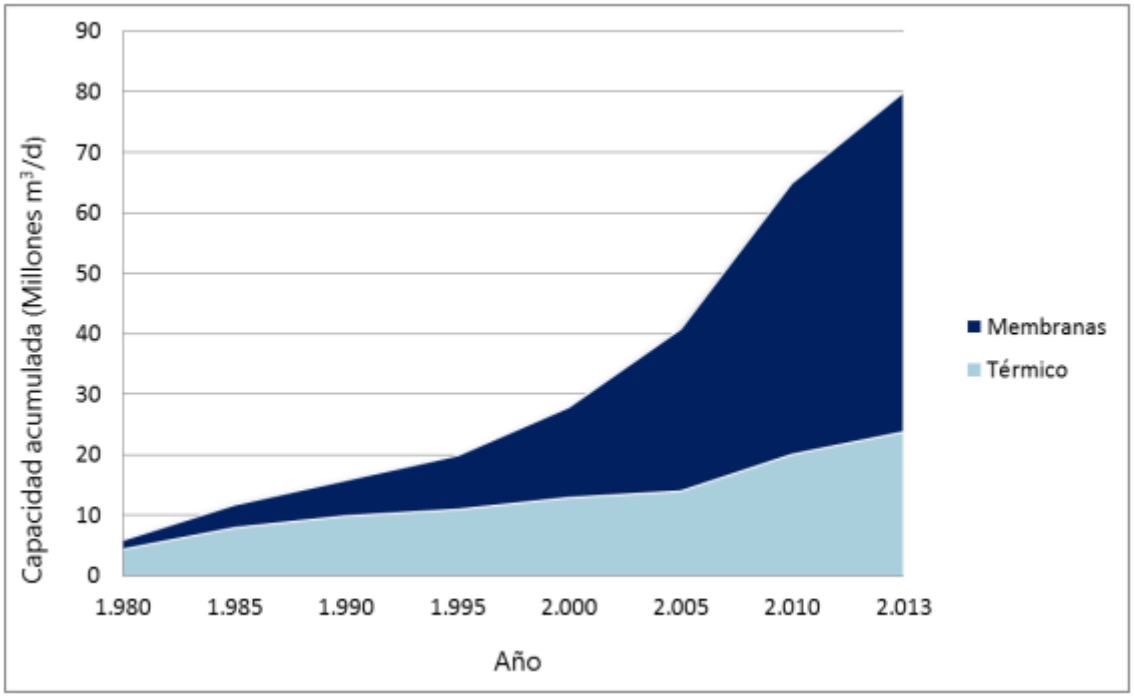
Sin embargo, el proceso de desalación de agua de mar mediante otras tecnologías se ha realizado desde hace varios siglos atrás. Existían rumores de que en Europa por el siglo IV, San Basilio de Cesarea comentaba en sus Homilías la manera en cómo algunos marineros realizaban un procedimiento de destilación de agua de mar rústico realizado en calderos y recogiendo el agua evaporada a través de esponjas, obteniendo así agua dulce para beber durante su permanencia en el mar. Asimismo, existen registros escritos procedentes del siglo III donde se evidenciaba la destilación de agua de mar mediante los comúnmente llamados Alambiques. Durante la edad media, ya se tenía conocimiento de que algunos alquimistas realizaban este proceso de destilación de agua de mar, estos serían de los primeros destellos científicos de la desalinización de agua de mar. Incluso en el Renacimiento, se sabe que algunos alquimistas realizaban este proceso de desalación utilizando el sol como fuente de calor para la destilación a través de espejos orientados hacia el depósito donde se calentaba el agua de mar, generando así el calor necesario para el proceso. (Zarza Moya, 1991)

El proceso revolucionario de la desalación de agua de mar llegaría recién en los años 60 del siglo pasado, época donde se realiza el descubrimiento de la técnica de Ósmosis Inversa y unos pocos años después se tendrían la primera planta desaladora de Europa en Las Islas Canarias (1964). Este sistema es el más usado actualmente a nivel mundial, debido a su eficiencia y alto rendimiento dentro del marco de la desalación de agua de mar.

Según el Coordinador de Investigación y Desarrollo del CIEMAT, Eduardo Zarza Moya, en su artículo Desalación de Aguas del Mar mediante Energías Renovables, es a partir de la década de 1990 donde la obtención de agua dulce a partir de la desalación mediante ósmosis inversa adquiere un crecimiento importante a nivel mundial, llegando a una tasa de producción diaria de 13 millones de metros cúbicos la misma que con el pasar del tiempo iría aumentando todavía más. (Zarza Moya, 1991)

Figura 1.

Comparativa de la evolución de la capacidad instalada de producción de agua desalada entre membranas de ósmosis inversa y procesos térmicos.



Nota: Fuente (Cabero García, 2015)

De esta forma, y a través de un estudio comparativo de las tecnologías de desalinización existentes, la desalinización mediante ósmosis inversa se ha convertido en el descubrimiento más importante y eficiente para el tratamiento de agua de mar con el que se cuenta hasta el día de hoy, diferenciándose de otros métodos de desalinización como lo son la electrodiálisis,

destilación y evaporación súbita por su eficiencia en cuanto a la rentabilidad que esta tecnología genera en los proyectos de desalación. (Sánchez Alcaide, 2017)

1.2. Problemática

En la actualidad, nos encontramos en una época en donde el recurso hídrico destinado para el consumo humano es cada vez más escaso, debido a que a lo largo de los años nuestra principal fuente de tratamiento de agua potable han sido las masas de agua dulce cuya representación en el planeta solo equivale al 2,5 % del total del agua disponible en el mundo y siendo el agua de mar salada el 97,5 %, notoriamente mayor.

Nuestro país no es ajeno a la escasez del recurso hídrico. El aumento de la población y el crecimiento demográfico desordenado sin planificación ha generado que la mayor parte de nuestra población se encuentre asentada sobre la costa, zona donde se cuenta con la menor cantidad de agua dulce disponible para el tratamiento de agua potable. A continuación, se muestra un cuadro resumen de la disponibilidad hídrica en nuestro país clasificadas en 3 vertientes en comparación con la cantidad de habitantes en el país.

Tabla 1

Disponibilidad Hídrica vs. Hab. en el Perú según las Vertientes en 2020

Vertientes	Disponibilidad Hídrica Total = 1,7 M de m3	Habitantes en Perú 32 625 948 habitantes
Atlántico	97%	33,50%
Pacífico	2,44%	62,40%
Titicaca	0,56%	4,10%

Nota: Fuente: INEI

Como se puede notar en la Tabla 1, la vertiente del pacífico (zona costera) cuenta con apenas el 2% de la disponibilidad hídrica del país y a su vez, es donde se encuentra asentada la mayor parte de la población nacional llegando alrededor del 62,4% según el INEI. Esto muestra

claramente la problemática de la realidad nacional ante el crecimiento demográfico y la oferta de agua para consumo humano disponible en la zona costera, todo ello debido a que hasta hace unos años solo hemos considerado como fuente de tratamiento de agua para consumo humano las masas de agua dulce existentes.

Sin embargo, como se explicó en el capítulo anterior, en la actualidad se cuenta con tecnologías capaces de aprovechar esas masas de agua con mayor presencia a nivel mundial alojadas en los océanos. Estos avances, aplicados a nuestra realidad nacional específica solucionarían la escasez de agua potable en las zonas costeras de nuestro país mediante la producción de agua potable en plantas desaladoras de agua de mar.

En el Perú, a través del gobierno, se vienen desarrollando varios proyectos de plantas desalinizadoras de agua de mar utilizando la tecnología de ósmosis inversa para la producción de agua potable. Sin embargo, no existen experiencias anteriores de plantas desaladoras a gran escala de este tipo y no se cuenta con un punto de referencia inicial para la operación y mantenimiento ante el inminente crecimiento de esta tecnología debido a la realidad nacional. Es por ello que, considero necesario y oportuno el compartir mi experiencia en la operación y mantenimiento de este tipo de plantas de forma que permita generar alguna referencia inicial para futuras instalaciones similares en el país.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Generales

- Identificar los eventos comunes y particulares que ocurren durante la puesta en marcha, operación y mantenimiento de una planta desalinizadora de agua de mar.
- Proponer alternativas de solución generales aplicables a los eventos identificados.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Proponer en base a la identificación de problemas operativos, una propuesta de solución ante ellos, así como actividades de mantenimiento de equipos y unidades de proceso que permitan prevenir la ocurrencia de estos problemas y/o ser detectados a tiempo.

Capítulo II. Fundamento Teórico

2.1. Desalinización: Conceptos y tecnologías

2.1.1. Concepto

La desalinización del agua es un proceso termodinámico cuya finalidad es fomentar la separación del agua o las sales a partir de un agua salobre o agua de mar. (Pineda Arellano, 2018)

Como se indicó anteriormente, el agua de alimentación puede ser agua de mar o agua salobre, de ello dependerá el tipo de eficiencia y diseño de la planta desaladora debido básicamente a la mayor salinidad que tiene una respecto a la otra. Para ello, dentro de la operación de este tipo de plantas el parámetro operativo más utilizado e importante que referencia el contenido de sales es la conductividad eléctrica del cual se detallaré más adelante.

En nuestro litoral peruano y específicamente en Lima, se tienen valores de conductividad que oscilan entre los 51 a 56 mS/cm, como se observa en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2

Valores de conductividad eléctrica en playas de Puerto Chico y Chorrillos.

Estación de Muestreo	Conductividad Eléctrica CE (µS/cm)					
	05/02/18	10/03/18	26/04/18	21/05/18	15/06/18	20/07/18
PM 1	53.07	50.91	51.08	51.42	50.11	50.79
PM 2	55.59	55.23	55.60	55.90	53.44	54.97
PM 3	52.50	51.47	52.52	51.66	51.14	51.42
PM 4	51.53	51.30	51.51	52.50	50.12	51.12
PM 5	51.08	51.05	51.09	51.14	50.92	51.02
PM 6	51.04	50.89	51.03	51.32	50.14	50.78
PM 7	53.18	52.92	53.28	53.72	51.65	50.70
Media	52.00	**Me**	51.37	**Mo**	51.08	**CV** 3%
S	1.57	**Vmáx**	55.90	**Vmín**	50.11	3%

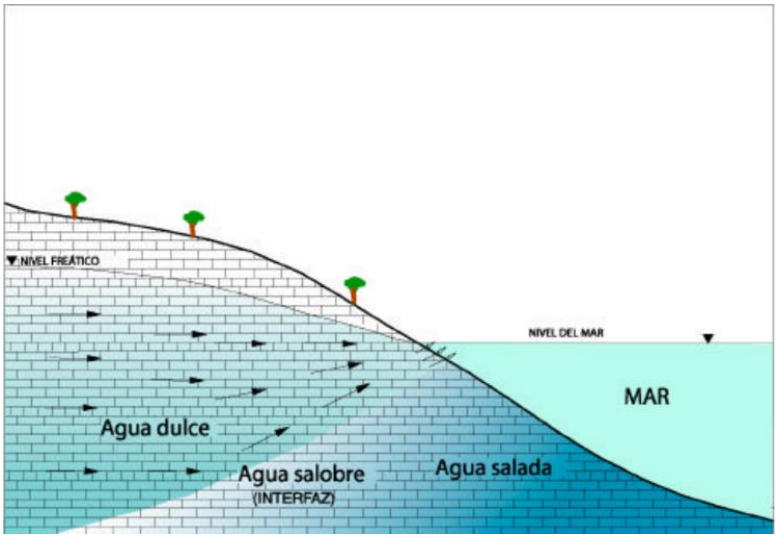
Nota: Fuente (PENAS RIOS, 2018)

En la publicación referente a la alternativa de aguas salobres como fuente de tratamiento para agua potable (López Geta & Mejías Moreno, 2000), se explica que existe una influencia importante en cuanto a los costes de producción de agua desalada dependiendo de cuál sea la fuente de alimentación de la planta: agua salobre o agua de mar.

Para explicar gráficamente la diferencia entre agua de mar y agua salobre, se presenta la siguiente imagen.

Figura 2.

Esquema de acuífero en contacto con el mar. Identificación de las tres fases: Agua dulce, Agua Salobre y Agua de Mar.



Nota: Fuente (López Geta & Mejías Moreno, 2000)

Como se puede ver en la Figura 2, el agua salobre no es más que la interfaz que conecta las zonas de agua dulce y agua salada dentro de un mismo acuífero. Dependerá del área de ingeniería, las condiciones topográficas, recursos, y demás características específicas de cada proyecto el definir el punto de extracción del agua de alimentación. En el caso específico de este trabajo, se considerará una alimentación de agua de mar.

2.2. Técnicas de Desalinización

Así como el agua de alimentación puede clasificarse en agua salobre y agua de mar, el proceso de desalación también puede ser clasificado en dos grandes grupos: Separación del agua de las sales y Separación de sales del agua. A su vez, estas separaciones pueden subdividirse en función al tipo de energía utilizada o proceso desarrollado, tales como vapor (evaporación), frío (cristalización), presión (membranas), carga eléctrica (membrana selectiva) y atracción química (resinas). (Dévora Isiordia, González Enríquez, & Ponce Fernández, 2012)

Tabla 3

Tipos de tecnologías aplicadas para la desalinización del agua

Clases de Separación	Energía Utilizada	Proceso	Sistema
Separación de agua de las sales	Vapor	Evaporación	Destilación Solar
			Destilación súbita simple
			Destilación súbita multietapa
			Destilación multiefecto en tubos horizontales
			Destilación multiefecto en tubos verticales
			Compresión mecánica de vapor
			Termocompresión de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos
			Congelación
	Presión	Membranas	Ósmosis Inversa
Separación de sales del agua	Carga Eléctrica	Membrana Selectiva	Electrodiálisis
	Atracción Química	Resinas	Intercambio iónico

Nota: Fuente (Dévora Isiordia, González Enríquez, & Ponce Fernández, 2012).

Debido a la existencia de muchas tecnologías aplicables a las aguas de mar y aguas salobres, se han desarrollado muchos estudios e investigaciones donde se evalúa el comportamiento de todas ellas con la finalidad de encontrar el valor o costo de producción por metro cúbico, y para ello se presenta la siguiente tabla:

Tabla 4

Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos

Tecnología	Costo de Producción (USD/m^3)	Consumo Energético (kWh/m^3)	Recomendable en:
Ósmosis Inversa	0.6	2.4-2.8	Agua de mar y salobre
Electrodiálisis	0.32	2-2.5	Agua salobre
Destilación Multiefecto	1.5	3.4-4.0	Agua de mar
Destilación Flashing Multietapa	1.1	5-8	Agua de mar

Nota: Fuente(Pineda Arellano, 2018).

Como se puede observar en la Tabla 4, encontramos a la tecnología de Ósmosis Inversa y Electrodiálisis como las de menor costo de producción. Sin embargo, el análisis realizado en este estudio para la Electrodiálisis es aplicable solo sobre Agua Salobre y no para agua de mar.

Debido a la variedad de técnicas de desalinización, es necesario realizar un estudio que las compare todas (o al menos las principales) dentro de un mismo escenario, a fin de determinar la tecnología más apropiada en cuanto a costos de producción, mantenimiento y operatividad.

Actualmente, muchos de los estudios realizados respecto al tema consideran a la tecnología de desalinización por ósmosis inversa como la más eficiente y viable de manera técnica y económica. Un ejemplo de ello se muestra en un estudio comparativo donde se evalúan los principales procesos de desalinización (ósmosis inversa, electrodiálisis, destilación por múltiple efecto y desalación súbita por efecto flash), en donde considerando indicadores económicos como: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Plazo de Recuperación; se llega a la conclusión que la alternativa de desalación por Ósmosis Inversa es la más viable debido a los menores costos de producción, inversión inicial y mantenimiento

necesarios para la operación (Sánchez Alcaide, 2017).

2.3. Principales métodos de desalinización

Existen muchos métodos utilizados en la desalinización del agua, siendo los mencionados en el punto anterior los más importantes y conocidos. En este punto se describirán los métodos de: Evaporación por Efecto Múltiple, Evaporación súbita por efecto flash, Electrodiálisis y Ósmosis Inversa.

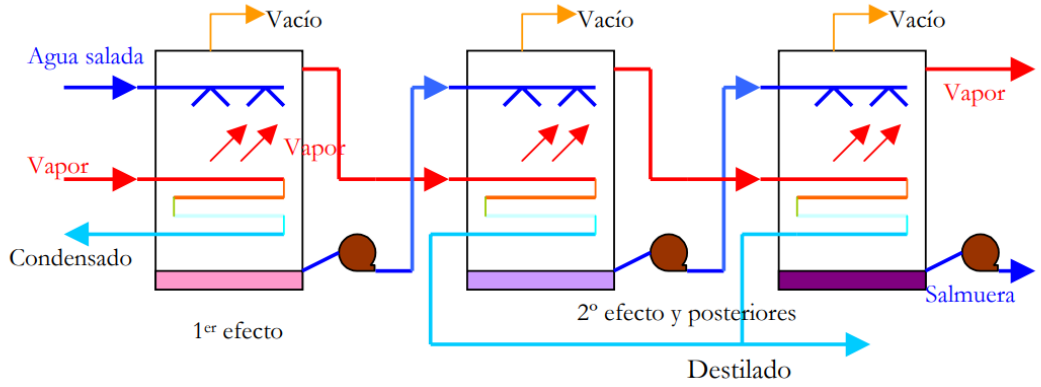
2.3.1. Evaporación por Efecto Múltiple (MED)

El proceso de desalación por efecto múltiple es gobernado por tres eventos principales: cambios de fase del agua, transferencia de calor y puntos de ebullición de la salmuera que depende de la concentración de sales y de la presión. La evaporación por efecto múltiple consta de un primer recipiente/contenedor donde ingresa el agua de alimentación (agua salada) y es necesaria una fuente de calor necesaria para generar la evaporación del agua en el recipiente, quedando así una salmuera concentrada de sales.

En una segunda etapa, el vapor generado en la primera etapa es transportado a un segundo recipiente donde ingresará el agua salmuera generada en la primera etapa. En esta etapa, el vapor proveniente de la primera etapa transferirá calor latente hacia el recipiente que contiene la salmuera y provocará una nueva evaporación en el segundo recipiente. Y así sucesivamente, este proceso y el mecanismo de destilación se repite las veces que se considere necesario. Cabe indicar que, a medida que la salmuera pasa de una etapa a otra va concentrándose cada vez más y sumado a la variación de presiones originada por la temperatura produce un cambio en el punto de ebullición de la salmuera por lo que como puede se puede ver, la evaporación dependerá de muchos factores que se encuentran asociados (Hidalgo Montesinos, 2006).

Figura 3.

Destilación múltiple efecto con evaporadores horizontales



Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

2.3.2. Evaporación súbita por efecto flash (MSF)

La evaporación súbita por efecto flash se da al introducir un líquido concentrado (agua salada o salobre) calentándolo dentro de una cámara flash, la cual se encuentra a condiciones de baja presión propiciando una ebullición sobre el líquido a una menor temperatura. Este vapor continúa su camino para disipar su calor latente mediante unos tubos dentro de la cámara flash antes mencionada ayudando así a calentar el líquido de ingreso y condensándose luego de ello (Valero, Uche, & Serra, 2001).

Figura 4.

Esquema de una planta con sistemas MSF

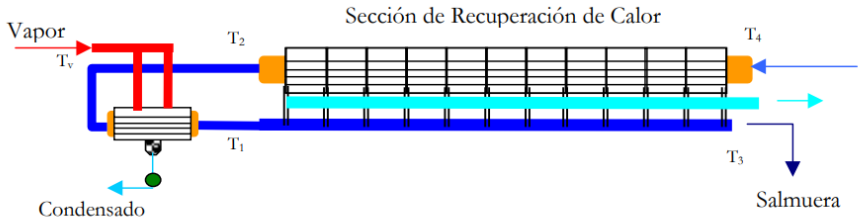


Figura a1.1. Descripción general de una planta MSF sin recirculación de salmuera.
Fuente: Botero (2000).

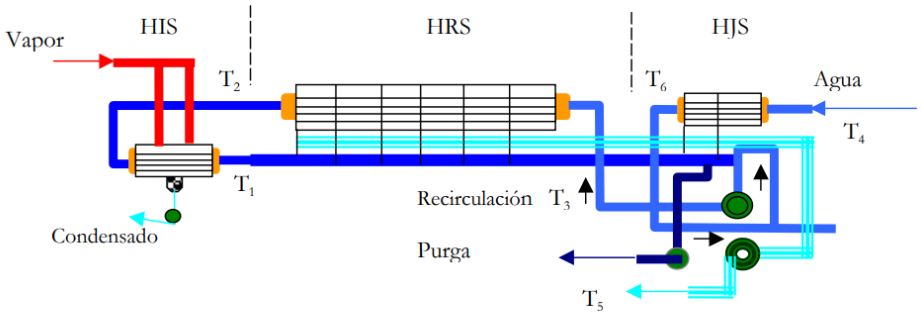


Figura a1.2. Esquema de una planta MSF con recirculación.
Fuente: Botero (2000).

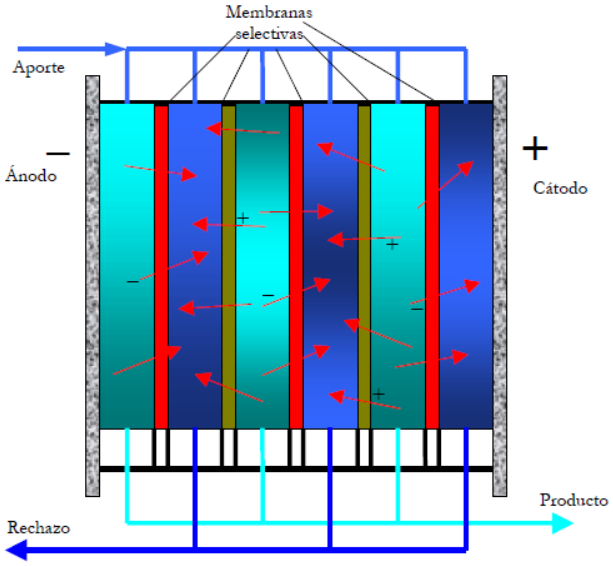
Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

2.3.3. Electrodiálisis

El proceso de la electrodiálisis consiste en una desmineralización de los iones con cargas negativas o positivas con las que cuenta el agua. Estos iones se mueven a través de membranas selectivas al ser atraídos por los campos eléctricos producidos por electrodos con diferencias de potencial, teniendo así de un lado un agua desmineralizada y del otro agua sobresaturada o salmuera (Valero, Uche, & Serra, 2001).

Figura 5.

Proceso de Electrodiálisis



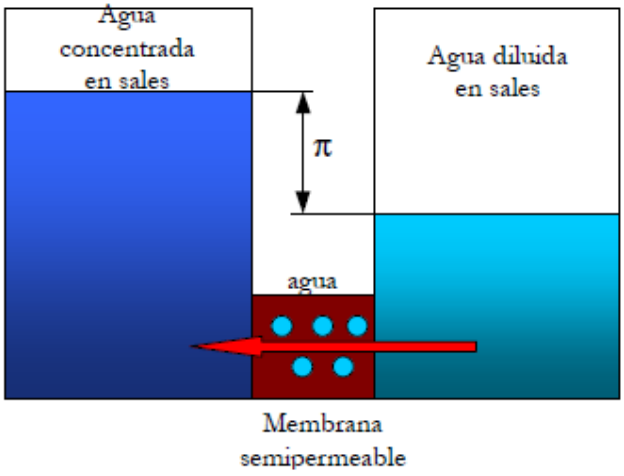
Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

2.3.4. Ósmosis Inversa

El principio de ósmosis inversa se basa en la inversión del proceso natural de ósmosis directa. Si se tienen dos tipos de agua con diferente concentración de sales, por ejemplo: agua destilada y agua de mar divididas por una membrana semipermeable, ocurrirá un proceso natural llamado ósmosis directa. Este proceso consiste en que el agua con menor cantidad de sales atravesará la membrana intentando reducir la concentración de sales que existe en el otro lado, aumentando la cantidad de agua y, por ende, disminuyendo la concentración de soluto (sales) inicial. Esto originará que exista una diferencia de alturas entre las columnas de agua con mayor y menor concentración ejerciendo una presión de una sobre la otra, a esta presión se le denomina presión osmótica (Tejedor, 2008).

Figura 6.

Proceso de ósmosis directa

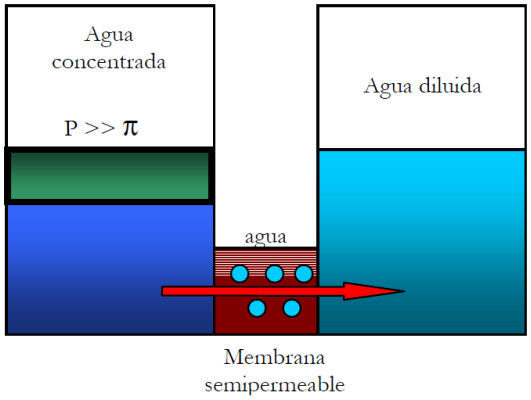


Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

Si, de alguna forma, se logra “empujar” la parte de mayor altura (mayor concentración de sales) mediante una presurización del sistema que logre vencer la presión osmótica, el proceso de ósmosis directa se invertiría y, al ser una membrana semipermeable, se obtendría un paso del agua desde el lado más concentrado hacia el lado menos concentrado a través de la membrana obteniendo una mayor cantidad de agua sin sales y generando un residual de agua con gran concentración de sales (Tejedor, 2008).

Figura 7.

Proceso de ósmosis inversa



Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

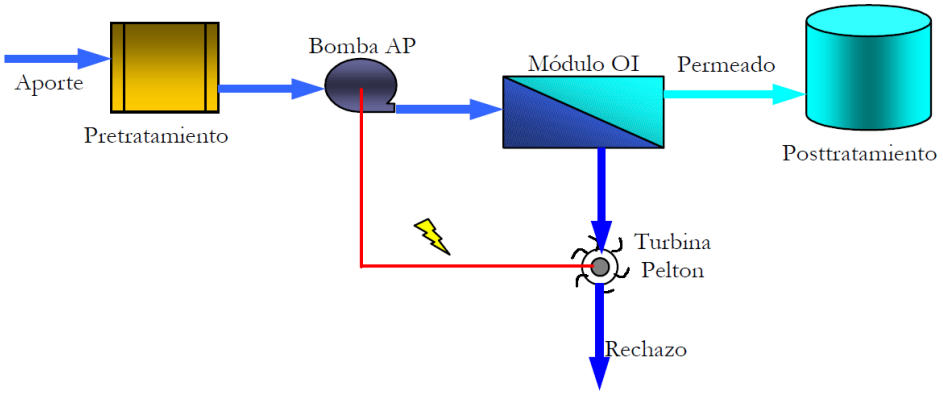
Este proceso de ósmosis inversa permite producir agua con concentraciones aceptables de concentración de sales (medidos como conductividad eléctrica o STD), sin embargo, la calidad y pureza no es comparable a los procesos de destilación anteriormente mencionados ya que la evaporación del agua generará un alto grado de eficiencia debido al punto de volatilización elevado de las sales (300°C aproximadamente) y distante del punto de evaporación del agua (Valero, Uche, & Serra, 2001).

En la práctica, el proceso de desalación por ósmosis inversa se realiza a través de membranas semipermeables las cuales deben permitir el paso del agua y generar un alto rechazo de sales. A diferencia de un proceso de filtración, este proceso de ósmosis inversa a través de membranas semipermeables se genera con un flujo paralelo a la membrana permitiendo que solo una parte del agua de alimentación llegue a atravesar la membrana y la otra sea rechazada junto con las sales retenidas como un agua con mayor concentración de sales o salmuera (Tejedor, 2008).

El proceso de desalación de ósmosis inversa implica un ensuciamiento rápido de las membranas al estar expuestas a las altas presiones y caudales que las plantas desaladoras demandan, por ello, es necesario implementar un sistema de pretratamiento efectivo que permita entregar el agua de alimentación a los bastidores de ósmosis con la mejor calidad posible. Asimismo, el proceso de ósmosis inversa acidifica el agua por naturaleza al extraer gran parte de los minerales necesarios para un agua potable, Por ello, es necesario un postratamiento en la salida de las membranas que remineralice el agua y estabilice el pH en valores aptos para el consumo humano (Valero, Uche, & Serra, 2001).

Figura 8.

Esquema de los procesos de una planta desaladora por ósmosis inversa



Nota: Fuente (Valero, Uche, & Serra, 2001)

2.4. Unidades de Tratamiento recomendadas para la Desalación de Agua de Mar

Como se indicó en el punto anterior, para lograr la potabilización de agua de mar a través de un proceso de ósmosis inversa es necesario contar con un conjunto de procesos unitarios capaces de preparar y acondicionar el agua de alimentación al ingreso de las membranas de ósmosis y posterior a ello un postratamiento que remineralice y desinfecte el agua Osmotizada, convirtiéndola en agua potable apta para el consumo humano.

Para ello, se proponen y describen las siguientes unidades típicas de una planta desaladora por ósmosis inversa.

2.4.1. Pretratamiento

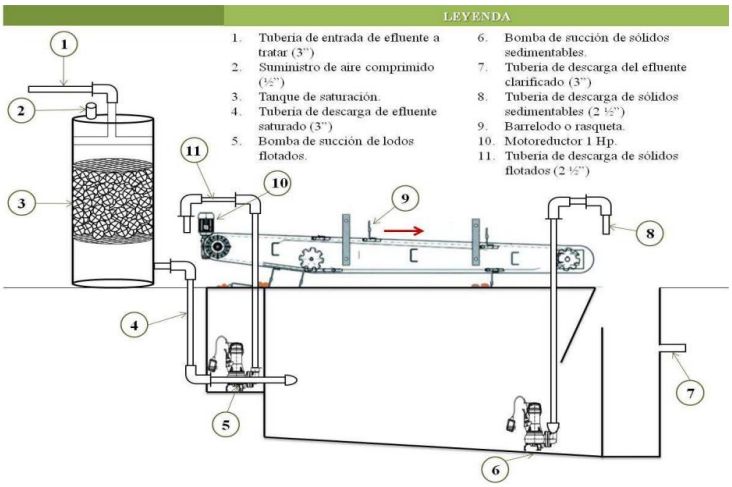
Flotación por Aire Disuelto (DAF)

Este proceso sirve para un tratamiento inicial mediante la inyección de aire disuelto que permita eliminar mediante un arrastre hacia la superficie (flotación) de las grasas, aceites y partículas sedimentables que pueda contener el agua.

Las grasas y aceites suelen por naturaleza flotar en la superficie, pero este no es el caso de las partículas sedimentables. Para la remoción de estas partículas mediante un sistema DAF, normalmente vienen acompañadas de un proceso previo de coagulación y floculación con la finalidad de formar flóculos más grandes de tal forma que puedan ser arrastrados a la superficie por el aire disuelto. Estas siglas DAF también son aplicadas para el proceso de Flotación por Aire Difuso, esta variante tiene el mismo principio hidráulico que el proceso original con la distinción que la burbuja al ser generada por un jet tiene un mayor diámetro medio que la originada por el aire disuelto haciendo menos eficiente el proceso, sin embargo, es aplicable en algunas circunstancias ya que representa menores costos de inversión (Orozco Jaramillo, 2005).

Figura 9.

Esquema gráfico de un sistema DAF



Nota: Fuente (Riera & Graterol, 2015)

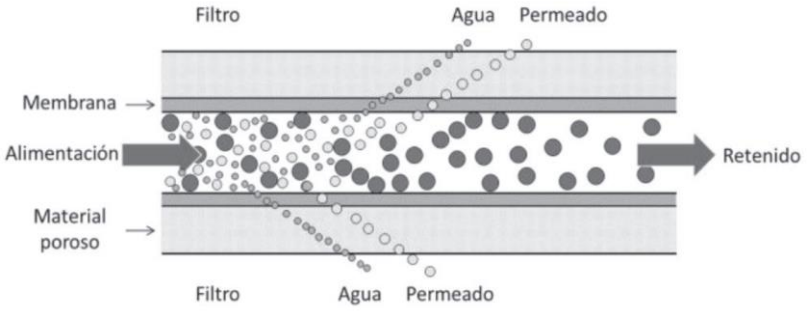
Para la planta desalinizadora de agua de mar considerada como modelo de este trabajo se consideró en el diseño un sistema DAF con dos unidades previas de coagulación y floculación mediante el uso de cloruro férrico y polielectrolito aniónico.

Ultrafiltración

La ultrafiltración es un proceso de filtración por membranas usado para separar partículas coloidales de arcillas, polímeros, almidones, partículas de látex, bacterias, virus y combinaciones proteicas de diferentes pesos moleculares. El principio de filtrado se basa en limitar el paso de estas partículas a través de membranas semipermeables porosas cuyo paso va entre 0,01 a 0,1 micras. (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017)

Figura 10.

Sistema de separación de membranas



Nota: Fuente (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017)

Como se observa en la imagen anterior, el proceso de ultrafiltración se lleva a cabo utilizando la presión hidrostática del agua para forzar el paso de esta a través de la membrana semipermeable. Es decir, genera a partir del agua de alimentación 2 subproductos: agua permeada que atraviesa la membrana y un porcentaje pequeño de agua con las partículas retenidas llamado concentrado (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017).

Estos conceptos de presión hidrostática y caudales de alimentación, permeado y concentrado serán utilizados más adelante como parte de los parámetros de control operativos del proceso mediante los indicadores operativos de flujo permeado, permeabilidad a 20°C y presión transmembránica. Estos indicadores en conjunto con más datos recolectados de la operación nos darán un indicio del estado de la operación y la necesidad de acciones correctivas

o preventivas a considerar en las membranas.

Existen muchos tipos de membranas de ultrafiltración y estas pueden ser clasificadas según su naturaleza, estructura, o mecanismo de transporte del fluido. A su vez, estas clasificaciones tienen más subdivisiones:

Figura 11.

Clasificación de membranas

<table>
<tr><td rowspan="3">Naturaleza</td><td colspan="3">Biológicas</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sintéticas</td><td>Homogéneas</td><td>Inorgánicas
Orgánicas</td></tr>
<tr><td>Compuestas</td><td>Inorgánicas
Orgánicas
Mixtas</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Estructura</td><td rowspan="3">Estructura microscópica</td><td>Porosidad</td><td>Porosas
Densas</td></tr>
<tr><td>Configuración</td><td>Simétricas
Asimétricas</td></tr>
<tr><td>Líquidas</td><td>Compactas
Soportadas
En emulsión</td></tr>
<tr><td>Estructura macroscópica</td><td colspan="2">Laminares
Tubulares
Fibras huecas</td></tr>
<tr><td>Mecanismo de transporte</td><td colspan="3">Transporte convectivo
Transporte por difusión
Transporte por intercambio iónico</td></tr>
</table>

Nota: Fuente (Franco Ruiz, 2019)

Tomando como referencia la clasificación según su estructura macroscópica, se tiene que las membranas de Fibras Huecas cuentan con una mayor área efectiva y con ello la capacidad de filtrado es mejor en comparación a las membranas laminares o tubulares. (Franco Ruiz, 2019).

Dicho esto, en la planta desaladora considerada como modelo de referencia para el presente trabajo también se ha optado por el uso de este tipo de membranas (membranas de

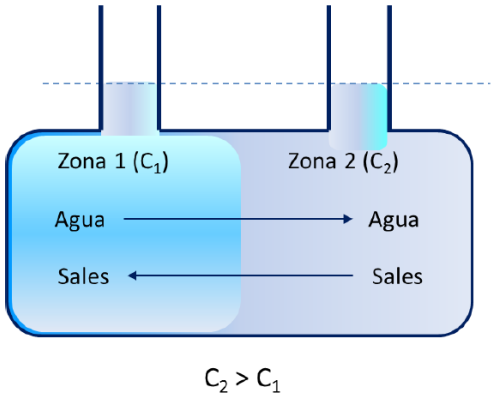
fibra hueca), debido a la ventaja que ofrece en el flujo por unidad de área permitiendo así generar un mayor volumen de filtrado.

2.4.2. Ósmosis Inversa

Planteando el escenario en donde se tenga dos soluciones de concentraciones diferentes dentro de un mismo recipiente, ocurrirá que ambas soluciones intentarán encontrar el equilibrio mediante la difusión de sales desde la que tenga mayor concentración hacia la de menor concentración y sucederá también un flujo de agua desde la que tenga menor concentración de sales hacia la que tenga mayor concentración de sales, este escenario se explica en la siguiente figura:

Figura 12.

Difusión de dos soluciones con concentraciones diferentes



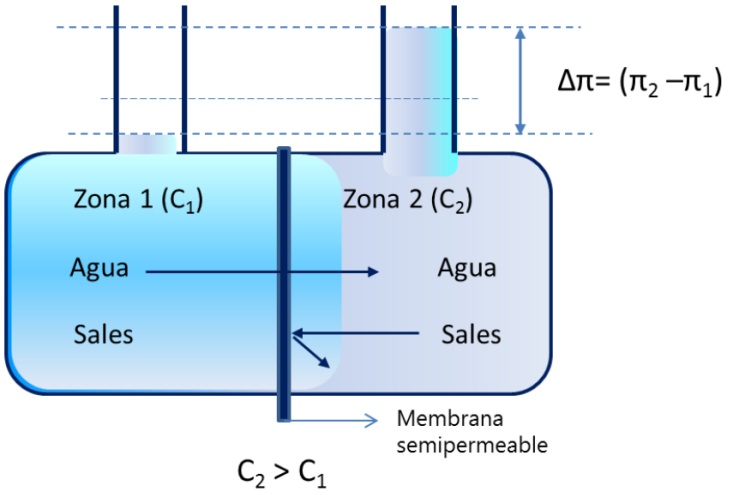
Nota: Fuente (Cabero García, 2015)

Considerando lo indicado en el escenario anterior, si agregamos entre ambas soluciones una membrana semipermeable que permita el paso del agua, pero no el paso de las sales, ocurrirá que el flujo de agua continuará yendo desde el lado de menor concentración de sales hacia el lado de mayor concentración y ,debido a la presencia de la membrana, el paso de sales

quedará restringido haciendo que el nivel de agua del lado de mayor concentración inicial se eleve hasta que la presión hidrostática ejercida por la columna iguale a la presión que provoca la difusión del agua a través de la membrana, este sería el concepto de ósmosis directa. (Cabero García, 2015)

Figura 13.

Proceso de ósmosis directa



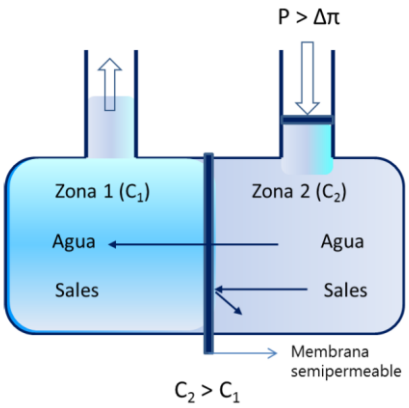
Nota: Fuente (Cabero García, 2015)

Como puede observarse en la Figura 13, el proceso de ósmosis directa genera una diferencia de niveles entre ambas zonas. Es necesario considerar que, cada solución debido a su composición cuenta con una presión osmótica diferente y que la diferencia de niveles representa la diferencia de presiones osmóticas de cada solución. (Cabero García, 2015)

Dicho esto, en el caso de la desalinización de agua de mar, se parte de una solución con alta concentración de sales y se busca la separación del agua de estas por lo que para poder lograr este fenómeno se necesita una fuerza (presión) necesaria suficiente para vencer a la diferencia de presiones osmóticas del agua de mar y el agua desalada a conseguir. (Cabero García, 2015)

Figura 14.

Proceso de ósmosis inversa



Nota: Fuente (Cabero García, 2015).

Como se indicó anteriormente, el proceso de ósmosis inversa aplicado a la desalación de agua de mar radica en ejercer sobre el agua salada la presión suficiente de tal forma que pueda vencer a la diferencia de presiones osmóticas de las soluciones necesaria para revertir el proceso de ósmosis directa logrando así una separación de fases en el agua de alimentación y generando dos productos conocidos como Permeado y Rechazo o Salmuera.

En el proceso de ósmosis inversa se cuenta con definiciones propias de las etapas, componentes y elementos del sistema de ósmosis inversa, las cuales serán detalladas en un siguiente capítulo, pero se describen de manera general a continuación (Cabero García, 2015):

- Agua de Alimentación: es el agua que ingresa a los módulos de ósmosis inversa para posteriormente generar el agua permeada y el agua de rechazo.
- Agua Permeada: es el agua tratada con baja concentración de sales luego de haber pasado por las membranas de ósmosis inversa.

- Agua de rechazo: también denominada salmuera. Es el agua que no ha logrado atravesar completamente las membranas de ósmosis inversa y que a su vez contienen un alto grado de concentración de sales.

Porcentaje de paso de sales: es la relación entre la concentración de sales en el agua permeada y concentración de sales en el agua de alimentación expresada en porcentaje.

Porcentaje de rechazo de sales: Expresa el porcentaje de sales que ha no ha sido admitido como parte del agua permeada. Matemáticamente, es la relación de la diferencia de concentraciones del agua de alimentación y agua permeada respecto de la concentración del agua de alimentación expresada en porcentajes.

Porcentaje de recuperación: es la relación entre el caudal de agua permeada y el caudal de agua de alimentación expresada en porcentaje.

Para llevar a cabo el proceso de ósmosis inversa, es necesario el uso de membranas que permitan la separación de sales del agua. Para ello, una membrana de ósmosis inversa debe tener ciertas características esenciales (Barracchini Moreno, 2004):

- Alto grado de permeado al agua.
- Alto grado de rechazo de sales.
- Elevada resistencia a productos químicos, rangos de pH y temperatura (sobre todo para las limpiezas de mantenimiento).
- Deben contar con una estructura resistente debido a las altas presiones de operación con las que se trabaja normalmente.

Comercialmente, las membranas de ósmosis inversa son en su mayoría elaboradas a

base de acetato de celulosa o poliamidas. Cada uno de estos materiales, cuenta con ciertas características operativas que definirán su elección en función de los procesos necesarios para cada planta. (Barracchini Moreno, 2004)

Membranas de Acetato de Celulosa:

- Alta permeabilidad al agua
- Elevado porcentaje de rechazo de sales
- Cuentan con una buena tolerancia de cloro residual. (Entre 0,1-0,5 ppm)
- Inestable químicamente, se hidroliza con el tiempo.
- Son biodegradables, las bacterias presentes en el agua de alimentación pueden degradar rápidamente la membrana.
- Vulnerable a disolventes orgánicos.

Membranas de Poliamida

- Elevado porcentaje de rechazo de sales
- Tienen estabilidad química. No se hidrolizan
- No son biodegradables
- El porcentaje de rechazo de sales se mantiene en el tiempo.
- Poca resistencia al cloro residual y oxidantes (<0,1 ppm).

Además de los materiales mencionados anteriormente, se cuenta también con algunos otros materiales utilizados en membranas para desalinización. Los tipos de materiales han sido evaluados en función de su capacidad para permitir el paso del agua y el rechazo de sales, tal como se puede ver en el siguiente cuadro:

Tabla 5

Rechazo de sales y permeabilidad según el tipo de material de membrana

Tipo de Membrana	Permeabilidad (m/Pa s)	Rechazo de sales (%)
Zeolitas	7 x 10-13	99.0
Nanotubos de Carbono	2 x 10-10	55.0
Acetato de Celulosa	4 x 10-12	98.0
Poliamidas - Agua de mar	4 x 10-12	99.8
Poliamidas - Agua de salobre	2 x 10-11	99.0

Nota: Fuente (Maldonado López, 2017).

De la tabla anterior, podemos ver que la zeolita, pese a tener un alto porcentaje de rechazo de sales, cuenta con la más baja permeabilidad por lo que generaría un flujo de agua permeada muy bajo siendo bajo el porcentaje de recuperación de la membrana y afectando directamente el volumen producido.

Los nanotubos de carbono, por el contrario, cuentan con la más elevada permeabilidad, pero a su vez, también tienen un bajo porcentaje de rechazo de sales por lo que esto afecta directamente a la calidad del agua permeada producida.

En la planta desalinizadora tomada como referencia para este trabajo se utilizó membranas de poliamida por ser las óptimas en cuanto a la relación permeabilidad y rechazo de sales.

2.4.3. Remineralización

Para poder entender el concepto de remineralización es necesario conocer primero la definición y concepto del parámetro de control operativo denominado Índice de Saturación de Langelier (LSI). Este parámetro es aquel que determina si el agua tiene un comportamiento corrosivo o incrustante en función de que tanto se aleja el valor obtenido del cero absoluto. Se

define como la diferencia entre el pH del agua y el pH de saturación. (Boluda Botella).

Para tener agua en equilibrio, el pH de Saturación debe ser igual al pH del agua. Si el pH del agua es superior al pH de saturación el agua tendrá un comportamiento incrustante. Por el contrario, si el pH del agua es menor que el pH de saturación el agua se comportará de forma corrosiva. Asimismo, la OMS recomienda un valor de LSI comprendido entre +/- 0,5 en aguas aptas para el consumo humano. (Boluda Botella)

Existen 3 técnicas principales para realizar el proceso de remineralización. Una de ellas consiste en la adición directa de sustancias con contenido de calcio y magnesio. Otra de las técnicas empleadas es la mezcla final del agua osmotizada con una parte del agua de alimentación. Finalmente, la técnica más fiable y más utilizada (dependiendo de la disponibilidad del producto) es la que estos elementos se agregan mediante disolución de un mineral como la calcita la cual contiene carbonato de calcio. Esta última técnica suele ser la más adecuada ya que no adiciona elementos no deseados al agua, es de fácil operación y se obtiene una capacidad amortiguadora elevada en el agua. (Villegas MEndoza, Piña Soberanis, Alvilla Rivera, Silva Luna, & Linares Ocampo, 2020)

En la planta tomada como referencia para este trabajo se consideró desde el diseño, el uso de la disolución de carbonato de calcio en el agua generada en una reacción química que utiliza Dióxido de Carbono como factor limitante de la reacción para la formación de bicarbonatos, según como lo explica la siguiente ecuación química:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

2.4.4. Desinfección

Los procesos de desinfección tienen como finalidad la inactivación y/o destrucción de las

sustancias o microrganismos que puedan afectar a la salud de las personas. En la actualidad, existen muchas sustancias con capacidad de desinfectar el agua, pero es de suma importancia la selección del desinfectante en función a la finalidad que se tenga para el agua tratada, siendo el caso de estudio en este trabajo el agua potable para consumo humano.

Dentro de las opciones que comúnmente se manejan en las plantas de productoras de agua potable las más conocidas y utilizadas son: ozono, cloro y desinfección por radiación UV.

Asimismo, es de conocimiento general en el tratamiento de agua potable que el cloro ofrece un efecto destacable sobre los demás desinfectantes como la capacidad de obtener cloro residual presente en las redes de distribución de agua potable. Este cloro residual, además de evidenciar una correcta desinfección también garantiza la pureza del agua ante una posible nueva contaminación en las redes o en algún punto antes de llegar al consumidor final. Es por ello por lo que el cloro, utilizado en alguna de sus diversas presentaciones, es el producto desinfectante más comúnmente utilizado como parte del proceso de desinfección de las plantas de tratamiento de agua potable. (Ramírez Quirós, 2005)

En la planta utilizada de referencia para este trabajo se cuenta con un sistema de dosificación de cloro para la presentación de hipoclorito de sodio líquido al 12% de concentración.

2.5. Sistemas de Limpieza para Ultrafiltración y Ósmosis Inversa

Los sistemas de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa son procesos llevados a cabo mediante la utilización de membranas semipermeables que, debido a su naturaleza, retienen en cierto grado los contaminantes que no logran atravesar las membranas. Es por este motivo que, debido a este tipo de funcionamiento, periódicamente, es necesario llevar a cabo un procedimiento de limpieza de estas unidades para restablecer su eficiencia lo más cercana al diseño inicial, muy

aparte del desgaste natural por el tiempo de vida con las que estas cuenten.

Dicho esto, cada membrana en específico cuenta con un rango de parámetros de operación y limpieza para los cuales han sido diseñados. Con estos datos proporcionados por los fabricantes de membranas, se llevan a cabo procedimientos de limpieza con tiempos, insumos y secuencias de procesos específicos que permiten optimizar los recursos utilizados y obtener el restablecimiento de la eficiencia de las membranas.

En este trabajo se toma como referencia una planta desalinizadora que cuenta con unidades de ultrafiltración y ósmosis inversa. En los siguientes capítulos se describirá más a profundidad el tipo de limpiezas realizadas para cada unidad de tratamiento como parte de un mantenimiento preventivo y/o correctivo de ser el caso dentro de las condiciones de operación de la planta.

2.6. Principales contaminantes de membranas

Las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa pueden verse afectadas por una variedad de contaminantes presentes en el agua de alimentación. En este punto se resumirán algunos de los más probables contaminantes identificados por los fabricantes de membranas. Más adelante, se detallarán las soluciones de limpiezas químicas recomendadas aplicables a cada contaminante mencionado.

2.6.1. Precipitaciones de Carbonato de Calcio

Este compuesto es un contaminante muy fácil de encontrar en la mayoría de las aguas de aporte. En las membranas de ósmosis inversa, este carbonato suele depositarse debido a una falla en el sistema de dosificación del antiincrustante o por un aumento del pH no controlado en el agua de aporte, lo que lograría hacer precipitar este elemento. En caso de generarse estos precipitados y formar una contaminación en las membranas, estos pueden ser removidos

disminuyendo el pH del agua de alimentación a valores entre 3-5 durante una o dos horas. Los precipitados de carbonato que puedan haberse incrustado con mayor resistencia en las membranas pueden ser removidos mediante limpiezas químicas ácidas a pH bajo, usualmente se recomienda ácido cítrico. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.2. Precipitaciones de Sulfato de Calcio, Bario y Estroncio

Este tipo de precipitaciones son mucho más difíciles de eliminar y suelen estar relacionadas con algún fallo en sistema de dosificación de antiincrustante o con alguna sobredosificación de ácido sulfúrico para el ajuste de pH. Suele ser necesario una limpieza ácida un poco más agresiva que las necesarias para el carbonato de calcio, usualmente mediante el uso de ácido clorhídrico. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.3. Óxidos metálicos e hidróxidos

Los típicos contaminantes que ingresan dentro de esta clasificación son el hierro, zinc manganeso, cobre, aluminio, etc. Esto puede llegar a las membranas como resultado de la corrosión en algún punto del sistema (tuberías, tanques, accesorios, etc) o también como producto residual de pretratamientos que utilicen coagulantes a base de aluminio o hierro. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.4. Revestimiento de sílice polimerizado

Este tipo de contaminantes suelen ser de los más difícil de remover según lo señalado por los fabricantes de membranas y puede darse el caso que no puedan ser removidos por los métodos tradicionales, dependiendo del grado de ensuciamiento. Para removerlos, típicamente es necesario una limpieza agresiva en las membranas. De no tener los resultados esperados, se tienen experiencias de limpiezas mas fuertes como el bifluoruro de amonio pero tienen un alto nivel de peligrosidad y pueden dañar los equipos. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.5. Contaminantes coloidales

Los coloides tienen una base orgánica o inorgánica y se encuentran en suspensión en el agua al no ser posible su decantación por gravedad. El material coloidal suele tener hierro, silice, aluminio, azufre o materia orgánica dentro de sus componentes. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.6. Contaminantes de materia orgánica natural disuelta

Este contaminante procede usualmente de la materia orgánica vegetal en descomposición en aguas o pozos superficiales. Su composición química es compleja pero la mayor parte de los componentes son el ácido húmico o el ácido fúlvico. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

2.6.7. Depósitos microbiológicos

Suelen provenir de limos de bacterias, hongos, mohos, entre otros. Suelen ser difíciles de remover ya que la vía principal de ingreso de una solución de limpieza suele ser atascada por estos contaminantes. Para prevenir este tipo de contaminantes, se recomienda realizar desinfecciones periódicas con biocidas en las membranas y en las unidades de pretratamiento previas. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

Capítulo III. Principales parámetros de control operativo en una planta desaladora de agua de mar

En este capítulo, se desarrollan los principales parámetros de control operativo capaces de anticipar, detectar y corregir problemas sobre el funcionamiento de equipos, unidades y/o procesos de tratamiento con la finalidad de garantizar una adecuada calidad de producción, una eficiente gestión de los recursos y planificación de los mantenimientos necesarios para una adecuada etapa de explotación de la planta.

3.1. Turbidez

La turbidez es un parámetro que mide la facilidad con la que se dispersa la luz a través de una suspensión. Esta puede ser ocasionada por diferentes factores como material coloidal, arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica, microorganismos, partículas gruesas, etc. (Romero Rojas, 2009).

Como se puede inferir del párrafo anterior, la turbidez de una muestra representa un indicador óptico del agua y con esta información, al conocer su procedencia y etapa de tratamiento en la que se encuentra, puede ser un indicador aproximado del grado de contaminación del proceso o tratamiento.

Este simple parámetro siendo evaluado y aplicado correctamente, puede dar indicios de alguna falla en la operación o la necesidad de programación de un mantenimiento de unidades.

En el caso específico de una desaladora, existe un rango de valores de turbidez que tiene el agua de mar bruta y el agua tratada en cada etapa de tratamiento, por lo que una variación en este rango de parámetros podría ser indicador de alguna alteración en un proceso unitario.

Tabla 6

Rangos de turbidez típicos por etapa de tratamiento en una planta desalinizadora

Etapa	Turbidez (UNT)
Agua de Mar Bruta	0,4-5
Ultrafiltración	< 0,1
Ósmosis Inversa	< 0,1
Remineralización	0,3 – 0,6

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

Como se puede observar, según el valor de muestreo tomado y la ubicación del punto de muestreo puede determinarse un indicio de alguna contaminación por alteraciones en el proceso o necesidad de algún mantenimiento preventivo o correctivo de las unidades. Asimismo, el análisis de la turbidez en diferentes ubicaciones de un mismo proceso unitario puede ayudar a identificar el equipo y/o accesorio cuya operación no esté siendo correctamente realizada. Por ejemplo, una evaluación de la turbidez en diferentes puntos de los bastidores de ultrafiltración puede identificar rápidamente una posible fuga y contaminación por falla en la hermeticidad de una válvula.

Cabe resaltar que, cada planta de tratamiento cuenta con determinados valores propios del tratamiento, sistema y fuente de agua con las que opera por lo que los valores mostrados anteriormente solo son referenciales. Asimismo, como se mencionó anteriormente, deben de considerarse y evaluarse los factores que puedan afectar el comportamiento habitual del tratamiento.

3.2. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del agua cuantifica la capacidad del agua de conducir la corriente eléctrica, esta magnitud depende directamente de la concentración de iones disueltos y de la temperatura a la que se encuentra. (Romero Rojas, 2009)

En el ámbito de la desalinización, el control de la operación de una planta desaladora es medido en base a la conductividad eléctrica del agua ya que el agua de mar cuenta con gran cantidad de iones y sales disueltos lo que produce una elevada conductividad en el orden de los 40-60 mS/cm, este rango de valores de conductividad varía conforme las características del mar, la temperatura y los posibles grandes vertimientos que pueda tener en su cercanía al punto de alimentación.

En la práctica, la conductividad eléctrica no tiene variaciones importantes en ninguna unidad de tratamiento que no sea luego del paso por las membranas de ósmosis inversa. Estas membranas de ósmosis inversa reciben el agua de alimentación pretratada con una pureza elevada lograda a través de las membranas de ultrafiltración, sin embargo, hasta ese punto aún no ha logrado cambiar la concentración de iones y sales que posee reflejándose fácilmente al obtener lectura de conductividades del orden de 40-60 mS/cm.

El agua de alimentación luego de pasar el proceso de ósmosis inversa, genera dos subproductos: agua permeada (desalinizada) y agua de rechazo (salmuera). Tanto el agua de alimentación, agua permeada y agua de rechazo tienen rangos de conductividades conocidos, por lo que algún valor de conductividad fuera de los rangos comunes puede ser indicio de alguna falla en el sistema de ósmosis inversa.

Tabla 7

Valores de conductividad típicos de la planta desalinizadora según la etapa de tratamiento en el sistema de ósmosis inversa

Etapa	Conductividad (uS/cm)
Agua de Alimentación	40 000 – 60 000
Agua Permeada	200 - 1000
Agua de Rechazo	60 000 – 100 000

Nota: Fuente (Elaboración propia)

De forma similar al punto anterior referente a la turbidez donde utilizamos los valores de turbidez para rastrear fallas en el proceso de ultrafiltración, la conductividad eléctrica tomada en diferentes puntos del sistema de ósmosis inversa puede también identificar fácilmente alguna falla en el sistema y con ella la necesidad de algún mantenimiento correctivo en un componente del sistema. Por ejemplo, una conductividad elevada en el agua de alimentación es indicio de contaminación o filtración de agua de rechazo (salmuera) por falla en algún componente o accesorio del sistema de ósmosis inversa, generalmente alguna válvula que no realiza una correcta hermetización.

3.3. Presión Transmembránica (Ultrafiltración).

Este parámetro se encuentra dentro del proceso de ultrafiltración, se define como presión transmembránica (TMP) a la presión neta de trabajo necesaria para que el fluido atraviese la membrana de ultrafiltración. Este parámetro operativo, es un indicador del grado de ensuciamiento de la membrana, es decir, una TMP alta podría indicar un ensuciamiento en la membrana. Y, por el contrario, una TMP baja suele ser un indicador de una membrana limpia. (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

La TMP se calcula de la siguiente manera:

$$\mathrm{TMP} = \frac{(\mathrm{P_{alim}} + \mathrm{P_{conc}})}{2} - \mathrm{P_{filt}}\,, (\mathrm{bar}) \ldots (1)$$

Donde:

TMP: Presión Transmembránica (bar)

$\mathrm{P_{alim}}$: Presión de agua de alimentación (bar)

$\mathrm{P_{conc}}$: Presión de concentrado (bar)

$\mathrm{P_{filt}}$: Presión de filtrado (bar)

Fuente: (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

Como se indicó anteriormente, en la práctica, el valor de la presión transmembránica es un indicador de un probable ensuciamiento de la membrana que, de llegar a comprobarse, requeriría una intervención de limpieza química para restablecer los valores iniciales o más cercanos a lo inicial de las membranas.

Es necesario aclarar que, la presión transmembránica solo representa una probabilidad de ensuciamiento de la membrana ya que dentro de la operación de un sistema de ultrafiltración existen demás factores vinculados entre sí capaces de alterar el comportamiento normal de la TMP, como la temperatura y flujo. Para poder determinar con certeza que se trata de una membrana sucia o no, es necesario poder analizar todos los parámetros en conjunto y realizar una normalización de los valores obtenidos.

Cada membrana en función del fabricante tiene una resistencia específica de acuerdo con los materiales y estructuras contemplados en el diseño. Pero de manera general, el valor de la TMP es recomendable mantenerlo por debajo de 2 bares de presión ya que pese a la alta resistencia que pueda tener la membrana, el consumo energético necesario para que el fluido atraviese las membranas será mayor conforme se tenga una mayor presión transmembránica y si lo que buscamos es obtener una operación de alto rendimiento y eficiencia, optimizar el consumo energético también es una prioridad.

3.4. Flujo de Permeado o Flujo Filtrado

Este parámetro es aplicado al proceso de ultrafiltración y se define como el caudal por unidad de área que traviesa la membrana. Este valor es un indicador que posee una relación directa con la tasa de ensuciamiento y puede ser indicio de algunos problemas operativos o estructurales de la membrana. Como se indicó anteriormente, el proceso de ultrafiltración y en general los procesos llevados a cabo con membranas, varían mucho con la temperatura por lo

que es necesario que se analicen todos los parámetros en conjunto a fin de llegar a una conclusión real. (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

El flujo filtrado se calcula de la siguiente manera:

$$J = \frac{1000 \times Q}{A_m}, \left(\frac{l}{m^2 h}\right) \dots (2)$$

Donde

J: Flujo filtrado $\left(\frac{l}{m^2 h}\right)$

Q: Caudal filtrado $(\frac{m^3}{h})$

A_m: Área efectiva de membrana (m^2)

Fuente: (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

3.5. Permeabilidad a 20°C

Este parámetro forma parte también del proceso de ultrafiltración, y es también conocido como Flujo Específico Corregido con la Temperatura (TCSF), este es considerado el parámetro más importante dentro del monitoreo del funcionamiento de las membranas de ultrafiltración, ya que en su cálculo relaciona los dos parámetros anteriormente mencionados (Flujo y Presión Transmembránica) y establece un valor normalizado para poder ser interpretado independientemente de la temperatura de operación a la que se encuentre, ya que cuenta con un factor de corrección de la temperatura normalizándola el valor a 20°C. (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

El parámetro Permeabilidad a 20°C se calcula de la siguiente manera:

$$\mathrm{TCSF} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{TMP}} \times \ \mathrm{e}^{\left(-0{,}031\times(\mathrm{T}-20)\right)}, \left(\frac{\mathrm{lmh}}{\mathrm{bar}}\right)$$

Donde:

TCSF: Flujo específico corregido con la temperatura $\left(\frac{\mathrm{lmh}}{\mathrm{bar}}\right)$

J: Flujo de filtrado (lmh)

TMP: Presión Transmembránica (bar)

T: Temperatura del agua (°C)

Fuente: (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017)

Este parámetro es un indicador importante y muy representativo de la eficiencia de las membranas, siendo que un valor muy alto o bajo puede darnos indicios de comportamientos atípicos o la necesidad de mantenimientos preventivos y/o correctivos en los bastidores. Por ejemplo, un elevado valor de la Permeabilidad a 20°C puede indicar una alteración estructural o degradación en las membranas mientras que, un valor demasiado bajo indica un considerable grado de ensuciamiento y la necesidad de modificar los tiempos de lavado entre ciclos de filtrado o una limpieza química de recuperación. (Hydranautics, Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04, 2017).

En la práctica, un valor de permeabilidad cercano a los 50 lmh/bar, es síntoma de la necesidad de una limpieza de recuperación química, siendo que una buena limpieza realizada con éxito puede llegar a recuperar los valores de permeabilidad en un rango de los 200 lmh/bar. Dentro de las buenas prácticas operativas se debe priorizar mantener un valor de permeabilidad dentro de este rango para contribuir también a una eficiencia energética adecuada, ya que índices de permeabilidad bajos provienen también de elevadas presiones transmembránica que se reflejan en una necesidad de mayor consumo de energía en las bombas para vencer esta presión y atravesar las membranas.

3.6. Índice de Ensuciamiento (SDI).

El SDI es un método empírico para determinar la calidad o capacidad de ensuciamiento que tiene el agua de aporte dentro de un proceso de ósmosis inversa. Este método consiste en determinar el tiempo requerido para filtrar el agua a través de un filtro de 0,45 micras manteniendo una presión constante de aproximadamente 2,1 bar. El valor máximo recomendado para operar un sistema de ósmosis inversa sin fomentar un alto ensuciamiento es de 4. (Hydranautics, Boletín de servicio técnico TSB113.04, 2016)

El cálculo del SDI se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$SDI = P_{30} / T_t = 100 * (1 - T_i / T_f) / T_t$$

Donde SDI = Silt Density Index
P_{30} = % colmatación a una presión** de 30 psig (2.1bar)
T_t = Tiempo total del test en minutos (normalmente 15 minutos, pero puede ser menor si el 75% del colmatación** ocurre en menos de 15 minutos.
T_i = Tiempo inicial en segundos requerido para obtener la muestra.
T_f = Tiempo requerido para obtener la muestra tras 15 minutos (o menos).

NOTAS
* El tiempo para recolectar 500mL debería ser aproximadamente 5 veces más grande que el de 100mL. Si el tiempo para 500mL es mucho más grande que 5x, el SDI debería calcularse utilizando los tiempos de recolección de 100 ml.

Fuente: (Hydranautics, Boletín de servicio técnico TSB113.04, 2016)

3.7. Potencial REDOX.

El potencial REDOX se define como la capacidad que tiene determinadas sustancias para oxidar o ser oxidadas. La unidad de medida es el mV siendo el valor cero de referencia la reacción de reducción del hidrógeno. Como ejemplo, podemos entender que una muestra con gran presencia de oxígeno disuelto y pocas especies reductoras, tendrá un potencial REDOX mayor

que una muestra con abundantes especies reductoras (materia orgánica, entre otros) (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Las membranas de ósmosis inversa hechas de poliamida son susceptibles a una fácil degradación ocasionada por el cloro residual y otros oxidantes presentes en el agua de alimentación al sistema de ósmosis. Estas membranas son sensibles incluso a bajas concentraciones de cloro u otro agente oxidante por lo que es ahí donde cobra vital importancia el control del parámetro potencial Redox, ya que típicamente valores por encima de 300 mV presentes en el agua de alimentación pueden ocasionar daños irreparables en las membranas de ósmosis. Por ello es necesario un control riguroso de este parámetro, este potencial redox puede ser disminuido con la aplicación de bisulfito de sodio. Sin embargo, los fabricantes también indican que una sobredosificación de este compuesto puede llegar también a oxidar las membranas por lo que su aplicación debe ser solo la cantidad necesaria para disminuir el potencial redox. (Hydranautics, Boletín de servicio técnico TSB 105.11, 2014)

3.8. Porcentaje de Recuperación

Este parámetro de control se realiza en el sistema de ósmosis inversa. Se define como el cociente del flujo de agua producido por el sistema de ósmosis inversa (agua permeada) respecto del caudal de ingreso (agua de alimentación). Este valor varía en función del tipo de agua que ingresa a las membranas, siendo que, para sistemas con agua salobre el porcentaje de recuperación puede llegar hasta un 80% y, por el contrario, para sistemas de agua de mar el porcentaje de recuperación varía entre 38%-50%. (Valero, Uche, & Serra, 2001)

El cálculo del porcentaje de recuperación se realiza de la siguiente manera:

$$\%r = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100\%$$

Donde:

Q_a: Caudal de alimentación

Q_p: Caudal de agua permeada

El control de este parámetro operativo es importante ya que en la práctica un aumento o disminución del porcentaje de recuperación intempestivo respecto su diseño pueden ser ocasionados por distintas fallas en el sistema. Por ejemplo, un aumento considerable en el porcentaje de recuperación sin aumento en las presiones de ingreso podría indicar una afectación en las membranas respecto a su capacidad de permeabilidad selectiva. Es decir, podría representar que algún elemento ajeno al sistema ha ingreso al proceso de osmosis inversa dañando la estructura de las membranas (rasgándolas o dañando las juntas de separación entre salmuera y permeado) lo cual, además esto, podría representar una disminución considerable en la calidad de agua permeada al estar mezclándose parte del agua de rechazo (salmuera) por la vía del agua permeada.

Por el contrario, una disminución considerable del porcentaje de recuperación puede indicar el ensuciamiento severo de las membranas generando un aumento en el consumo energético y generando la necesidad de un mantenimiento correctivo con la finalidad de realizar una limpieza química de recuperación.

3.9. Caudal de Rechazo y Caudal Permeado.

Como se explicó en el capítulo anterior, el agua de alimentación al sistema ósmosis inversa origina dos subproductos denominados agua de rechazo y agua permeada. El control respecto de estos parámetros es más intuitivo respecto a las tendencias propias de la planta a operar. Existen valores de turbidez y conductividad típicos aplicables a cada subproducto y el

detectar una variación en los parámetros típicos obtenidos en estos dos flujos de agua podría evidenciar alguna falla en el proceso. Por ejemplo, un aumento en la conductividad típica de salida del agua permeada puede ser originado por aumento de temperatura en el agua, falla de válvulas de rechazo, desgaste de juntas labiales, mala hermeticidad en las tapas de los tubos de membranas, entre otros; por lo que deben de tomarse acciones preventivas y realizar las inspecciones y descartes necesarios para identificar el origen de esta variación.

3.10. Presiones del Sistema de Ósmosis Inversa

Para el caso nuestro, en base a la experiencia adquirida durante los años de operación de la planta desaladora. Se ha podido observar que los indicadores de presión suelen variar con la temperatura. A medida que aumenta la temperatura en el agua de mar, disminuye la presión necesaria de ingreso en el bastidor de ósmosis inversa. Y, por el contrario, cuando la temperatura disminuye se hace necesaria mayor presión de ingreso en el bastidor de ósmosis inversa. En este análisis de información, se logra determinar que aun cuando la temperatura varíe, las presiones oscilan con una variación entre 57-62 bar. Con estos datos referenciales de presiones de alimentación en función de la temperatura, podemos tener un punto de partida para determinadas condiciones de operación y analizar si las presiones obtenidas se encuentran dentro de lo esperado según las tendencias normales. En el caso de encontrar valores atípicos, pueden ser indicadores de problemas como, por ejemplo: si tenemos presiones por encima de lo esperado pueden ser ocasionadas por ensuciamiento de las membranas, una mala apertura de válvulas de rechazo o permeado, falla en el variador de las bombas al bombear más caudal de lo necesario, filtraciones de salmuera hacia el agua de alimentación, entre otros.

En resumen, el conocer las presiones habituales de un sistema de ósmosis inversa nos permite reconocer rápidamente la alteración en el proceso y en conjunto con la evaluación de

más parámetros anteriormente mencionados poder determinar las fallas, así como las acciones correctivas.

3.11. Normalización (Ósmosis Inversa).

Tal como se ha venido explicando, dentro del proceso de ósmosis inversa se tienen muchos parámetros operativos importantes a considerar, los cuales varían entre sí ante el cambio de alguno de ellos. Es por eso que, tomar valores tal cual lo indica el resultado de un muestreo no necesariamente implica un daño o mejora del sistema. Por ejemplo, si se tiene una presión de 60 bar en un sistema cuya agua de alimentación tiene una temperatura de 16 °C y luego en otro momento en el mismo sistema se tenga una presión de 58 bar con 18°C en el agua de alimentación no implica necesariamente una mejora sobre el funcionamiento de las membranas, sino que la disminución de la presión de ingreso es ocasionada por el aumento de la temperatura y la disolución mayor de sales que esto implica, por lo que una comparación directa entre presiones hubiera sido errónea. Para poder comparar los datos tomados directamente es necesario que se mantengan constantes los siguientes parámetros:

- Caudal de permeado
- Contrapresión de permeado
- Tasa o Porcentaje de recuperación
- Temperatura
- Sólidos disueltos o conductividad eléctrica

En el caso de que alguno de estos parámetros varíe es necesario normalizar los datos obtenidos llevándolo a condiciones estándar sobre las cuales puedan ser comparados y evaluados entre sí, de forma que permitan tomar decisiones respecto a la gestión de la operación.

Para ello, muchos fabricantes de membranas disponen de software de simulación gratuitos para obtener estos valores normalizados. (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

3.12. Estabilización de la Planta Desaladora.

Según los datos obtenidos durante los inicios de producción de agua potable en la planta desalinizadora referenciada en este trabajo, podemos observar que la mejor calidad de producción se obtiene luego de 24 h continuas de operación luego del encendido total de la planta, como se puede observar en la siguiente tabla donde se muestra la variación de la conductividad durante un encendido y operación típico de planta:

Tabla 8

Horas de funcionamiento vs Conductividad eléctrica producida

Horas de Funcionamiento (h)	Conductividad de Salida de Ósmosis (uS/cm)	Horas de Funcionamiento (h)	Conductividad de Salida de Ósmosis (uS/cm)	Horas de Funcionamiento (h)	Conductividad de Salida de Ósmosis (uS/cm)
0	487.1	29	433.65	58	431.59
1	470.82	30	435.16	59	432.67
2	467.1	31	431.45	60	434.71
3	467.41	32	431.27	61	433.38
4	464.66	33	430.38	62	430.82
5	463.64	34	430.81	63	431.16
6	459.49	35	431.01	64	429.79
7	465.98	36	431.25	65	431.2
8	460.17	37	431.94	66	431.05
9	454	38	433.78	67	431.92
10	453.95	39	430.66	68	430.85
11	454.43	40	430.66	69	430.51
12	458.96	41	431.31	70	431.62
13	453.71	42	431.46	71	431.15
14	449.81	43	431.53	72	431.74
15	449.47	44	434.15	73	430.69
16	443.44	45	430.24	74	429.82
17	440.48	46	430.53	75	430.14
18	438.99	47	431.91	76	430.06
19	438.8	48	431.40	77	430.72
20	437.47	49	431.40	78	431.18
21	437.9	50	431.31	79	431.55
22	436.88	51	430.38	80	431.24
23	432.5	52	431.5	81	431.37
24	432.48	53	430.74	82	431.13
25	432.04	54	431.3	83	430.72
26	432.36	55	430.88	84	431.23
27	431.46	56	431.95	85	431.55
28	432.41	57	430.64		

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

Figura 15.

Gráfica de Horas de funcionamiento vs Conductividad

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

Esta información, nos permite comprender que la mejor calidad de una planta desalinizadora se alcanza luego de varias horas continuas de producción por lo que es importante el poder controlar todos los factores necesarios que nos permitan garantizar una producción continua. A diferencia de una planta de agua potable convencional, donde la gran mayoría de los procesos vienen datos por una línea piezométrica que se apoya en el nivel natural de vertederos y unidades de tratamiento, en una planta desalinizadora, se tienen muchos procesos cuyo funcionamiento se realiza mediante presurización en línea. Este funcionamiento hace que la operación dependa de muchos equipos, válvulas, bombas, sistemas eléctricos y demás componentes cuyo monitoreo y mantenimiento debe de llevarse a cabo constantemente puesto que, una falla en el sistema ocasionaría una paralización de planta y un reinicio del tiempo de estabilización de esta

Capítulo IV. Condiciones de operación de la planta desalinizadora de agua de mar referenciada en este trabajo

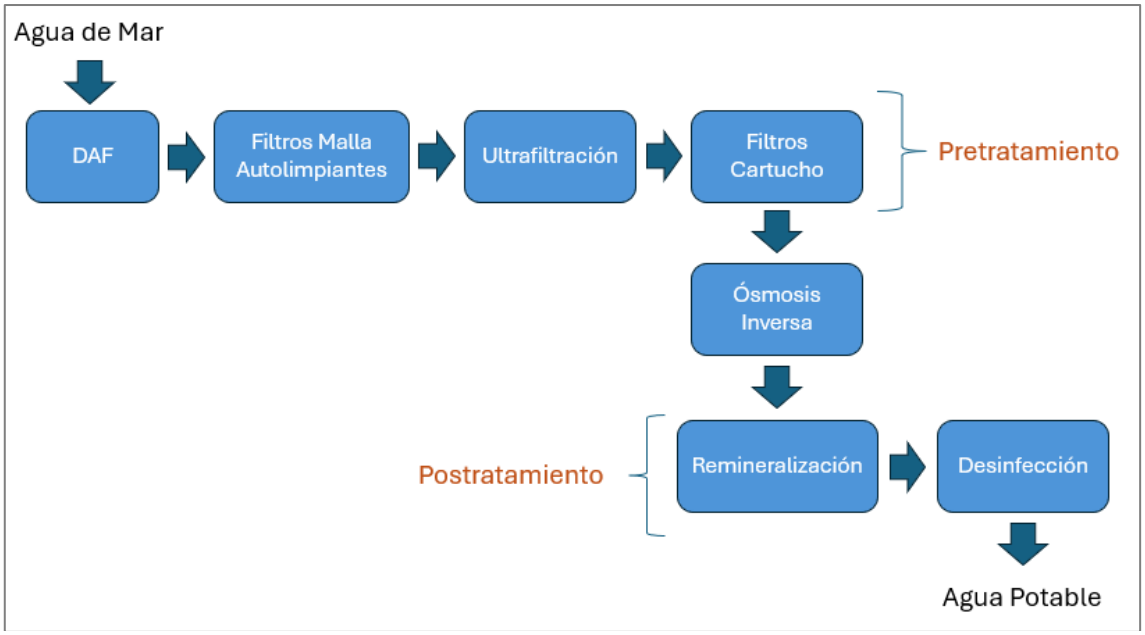
Para poder comprender en tu totalidad el funcionamiento de la planta de tratamiento tomada como referencia en este trabajo, es necesario conocer las condiciones de operación sobre la cual desarrolla el tratamiento de agua de mar.

El agua de mar es captada a través de una tubería sumergida en el mar a aproximadamente 1 km de la costa, esta tubería se encuentra conectada con unas pozas con bombas centrífugas sumergibles en su interior. Es así como, a través del bombeo realizado por estas bombas sumergibles y una línea de impulsión, llega el agua de mar a planta para iniciar con su tratamiento de desalinización y potabilización.

Luego de esto, el agua ingresa directamente a planta donde, para un mejor entendimiento, se clasificará todo el proceso de tratamiento en cuatro grandes grupos: Pretratamiento, Ósmosis Inversa, Postratamiento y Unidades de Proceso Complementarias.

Figura 16.

Diagrama de Flujo de Procesos de Tratamiento en la Planta Desalinizadora



Nota: Fuente (Elaboración Propia)

4.1. Definiciones previas

Para poder entender mejor los procesos, etapas y eventos específicos descritos en este trabajo y no crear la confusión por el uso de palabras coloquiales dentro de la operación de una planta, definiremos para este trabajo los siguientes términos:

4.1.1. Fase de puesta en marcha

Fase de transición entre la etapa de construcción y montaje de la planta y la etapa de operación y mantenimiento. En resumen, es la fase o etapa donde se prueban y acondicionan los equipos instalados, unidades construidas y demás componentes de la planta para que puedan funcionar de acuerdo a los parámetros de diseño establecidos o incluso mejorarlos de ser el caso, siempre con la previsión de que la siguiente etapa de operación y mantenimiento pueda realizarse con la menor cantidad de problemas/incidentes posibles.

4.1.2. Parada de planta

Durante la etapa de operación y mantenimiento, la planta desalinizadora no necesariamente estará en funcionamiento continuo todos los días del año, ya sea por una falla que ocasione que los equipos, unidades y demás componentes se apaguen o debido a un apagado de equipos programado a criterio del operador o por necesidad de mantenimiento. En ambos casos, se detendrá la producción de agua potable. A este apagado de equipos y unidades que ocasionen una detención en la producción de agua potable se le denominará parada de planta.

4.1.3. Arranque de planta

Durante la etapa de operación y mantenimiento, luego de una parada de planta programada o no programada, será necesario el volver a iniciar la producción por lo que todos los procesos de tratamiento deberán de habilitarse nuevamente a fin de reiniciar la producción de agua potable. A este proceso de encendido de equipos, unidades y componentes de la planta luego de esta haber sido detenida, se le llamará arranque de planta.

4.2. Pretratamiento

Como se mencionó anteriormente, el pretratamiento en una planta desalinizadora son todos aquellos procesos que preparan de la manera más adecuada el agua de mar previo a su paso por la Ósmosis Inversa. En esta planta tomada como referencia en este trabajo, se cuenta con los siguientes componentes como parte del pretratamiento: Flotación por Aire Disuelto (DAF), Cámara de Agua Clarificada, Bombeo de Agua Clarificada, Filtros Malla Autolimpiantes, Ultrafiltración y Filtros Cartucho.

4.2.1. Flotación por Aire Disuelto (DAF)

El agua proveniente del mar mediante la tubería sumergida e impulsada mediante las

bombas centrifugas sumergibles anteriormente mencionadas, llega a una primera cámara donde previo a su ingreso cuenta con un mezclador estático en el que se dosifica coagulante en las dosis necesarias para una primera formación de flóculos. A continuación, se distribuye hacia un vertedero en donde se dosificará floculante en el punto de turbulencia para luego pasar a la cámara de floculación donde se realizará una mezcla lenta con ayuda de agitadores de eje vertical.

Finalmente, el agua con los flóculos formados pasará nuevamente a través de un vertedero donde descargará en el sistema DAF haciendo que los flóculos formados asciendan arrastrados por el aire disuelto y sean removidos por unas paletas con cerdas plásticas hacia una poza de recolección. El agua clarificada, pasará a través de unos tubos ubicados en la parte inferior de la poza DAF hacia la Cámara de Agua Clarificada.

En esta planta, se cuenta con 3 líneas de pretratamiento independientes las cuales se usarán de acuerdo con la demanda de agua potable requerida por la población.

Figura 17.

Pretratamiento – Sistema DAF

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

4.2.2. Cámara de Agua Clarificada y Bombeo de Agua Clarificada

En esta unidad se recoge el agua clarificada proveniente de todo el sistema DAF. A su vez, es desde esta unidad de donde inician los procesos de filtración en serie. En la cámara de Bombeo de Agua Clarificada, se recoge el agua clarificada y se presuriza en un arreglo de tuberías cuya finalidad será atravesar por los procesos de Filtros Malla Autolimpiantes, Ultrafiltración y Filtros Cartucho, todos ellos uno a continuación de otro en un sistema de filtración continua donde el proceso siguiente dependerá del anterior.

Como es lógico, el agua clarificada al pasar cada uno de los procesos de filtración en serie experimentará una pérdida de carga que se verá refleja en la presión de salida de cada uno de los procesos. Es por ello por lo que, para que el agua clarificada pueda atravesar todos los pasos anteriormente indicados, el Bombeo de Agua Clarificada presuriza la línea en alrededor de 3-5 bares de presión. Esta presión inicial variará en función del ensuciamiento de las unidades de filtración aguas abajo y las pérdidas de carga que pudieran experimentarse.

4.2.3. Filtros Malla Autolimpiantes

Luego de que el Agua Clarificada es impulsada desde la Cámara de Bombeo de Agua Clarificada, tiene un primer paso por el sistema de Filtros Malla Autolimpiantes. Estos equipos contienen en su interior mallas metálicas de acero inoxidable en forma de cilindro que actúan de filtro permitiendo un paso de 100 micras a través de ellos.

Uno de estos filtros contiene 3 cilindros malla en su interior. Esos cilindros, a su vez, tienen posicionado centralmente en su interior un eje con escobillas de limpieza y orificios para drenar el agua procedente de la limpieza. Estos filtros, cuentan con un sistema de automatización que al detectar una diferencia de presiones en su ingreso y salida mayor a 0,3 bar activará automáticamente el sistema de limpieza haciendo girar las escobillas y accionando la apertura de los orificios de drenaje de agua de limpieza, posterior a ello los Filtros Malla Autolimpiantes tendrán una pérdida de aproximadamente 0,1 bar con lo que podrá trabajar con normalidad hasta

una siguiente elevación de la pérdida carga.

En la planta referenciada en este trabajo, se cuenta con 3 equipos de Filtros Malla Autolimpiantes. Luego de que el Agua Clarificada pase a través de ellos, pasará a llamarse Agua Filtrada y continuará con su proceso hacia la Ultrafiltración.

Figura 18.

Filtro Malla Autolimpiante

Nota: Fuente (STF-Filtros)

4.2.4. Ultrafiltración

Luego de haber pasado por los Filtros Malla Autolimpiantes, el Agua Filtrada ingresará a las unidades de Ultrafiltración. Estas unidades se agrupan en bastidores (también llamado Skid o Rack) que no es más que un conjunto de membranas de ultrafiltración agrupadas en una misma

estructura metálica con conexiones, tuberías, accesorios y válvulas necesarios para el funcionamiento del proceso de Ultrafiltración. Un solo bastidor de ultrafiltración cuenta con 79 membranas de ultrafiltración de 0,08 micras de paso, válvulas de ingreso, válvulas de salida, válvulas de regulación de caudal (proporcionales), válvulas de drenaje, válvulas de aire, tuberías de ingreso de agua filtrada, tuberías de salida de agua ultrafiltrada, tuberías de drenaje, tuberías de aire para lavados, tuberías de limpiezas químicas, entre otros.

Como es de esperarse, a medida que las membranas de ultrafiltración se encuentran en funcionamiento produciendo agua ultrafiltrada, estas se van ensuciando progresiva y naturalmente por los sólidos que van reteniendo en su interior, incrementando la pérdida de carga entre el punto de ingreso y salida de los bastidores ocasionando una variación en los parámetros operativos anteriormente definidos en el capítulo anterior (permeado a 20°C, presión transmembránica, flujo).

Por lo expuesto, la forma de funcionamiento de un bastidor de ultrafiltración no puede realizarse de manera continua durante horas o días, sino que, por el contrario, se realiza mediante ciclos de filtrado, donde 01 ciclo de filtrado consta de dos tiempos: tiempo de filtrado y tiempo de lavado.

El Tiempo de Filtrado, es aquel tiempo programable donde el Bastidor de Ultrafiltración se encuentra recibiendo Agua Filtrada y produciendo a través de las membranas de ultrafiltración Agua Ultrafiltrada. Es decir, el Tiempo de Filtrado es aquel tiempo donde el bastidor de ultrafiltración está en Servicio o en Línea de Producción.

El Tiempo de Lavado es aquel tiempo programable donde el Bastidor de Ultrafiltración deja de recibir agua filtrada y deja de producir agua ultrafiltrada, es decir, se encuentra fuera de servicio o fuera de línea de producción. Este Tiempo de Lavado es llevado a cabo mediante el accionamiento en conjunto de válvulas automáticas programables que permiten llevar fuera de servicio a un bastidor de ultrafiltración sin perjudicar a la producción de los otros bastidores que continúan en servicio o en línea de producción. Durante el tiempo de lavado, el bastidor de

ultrafiltración realiza un retrolavado (en sentido inverso a la producción) con agua ultrafiltrada proveniente del tanque de retrolavado. A su vez, se inyecta aire a través de la línea de aire de lavado. Esta combinación de agua en sentido inverso y aire permitirá remover los sólidos retenidos por las membranas y restaurar casi la totalidad del valor inicial de diferencia de presiones de ingreso y salida con la que inició su tiempo de filtrado. Al terminar del tiempo de lavado programable, el agua presente en las membranas de ultrafiltración es drenada para finalmente ser recargadas y presurizadas nuevamente con agua ultrafiltrada. Este procedimiento es de suma importancia ya que en caso de no realizarse la recarga o no presurizar de manera adecuada el bastidor, se tendrán problemas de desequilibrio de presiones y caudales cuando el bastidor fuera de línea entre en servicio nuevamente al sistema que se ya encuentra en funcionamiento. Luego de ello, el bastidor se encontrará nuevamente en servicio y los ciclos se repetirán durante toda la operación de la planta. Como podemos deducir, para el funcionamiento normal de la planta, es necesario tener como mínimo 02 bastidores de ultrafiltración en servicio para así poder continuar con la producción cuando uno de ellos se encuentre en el tiempo de lavado.

Posteriormente, el agua ultrafiltrada pasará hacia las siguientes unidades de tratamiento denominadas Filtros Cartucho. Previo a ello, una parte del caudal de agua ultrafiltrada llenará un tanque de almacenamiento llamado Tanque de Retrolavado, este tanque almacenará el agua necesaria para realizar las limpiezas durante el tiempo de lavado de los bastidores de ultrafiltración.

Adicionalmente, cada cierto número de lavados será necesaria una limpieza más profunda con hipoclorito de sodio para restablecer por completo a su valor original las diferencias de presiones de ingreso y salida en los bastidores de ultrafiltración a estas limpiezas de les llama Limpiezas de Mantenimiento. La forma de ejecución de estas limpiezas es similar a los tiempos de lavado, con la diferencia que cuanto se recarga de agua ultrafiltrada el bastidor esta viene con una dosis de hipoclorito de sodio. El resto del proceso será similar a los tiempos de lavado.

La pérdida de carga en esta unidad de ultrafiltración es de aproximadamente entre 0,7 - 1,5 bar, este valor variará en función del ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración.

En esta planta, se cuenta con seis bastidores de ultrafiltración instalados en paralelo. Se usarán parcialmente o la totalidad de ellos dependiendo de las condiciones de operación y la cantidad de agua a producir.

Figura 19.

Bastidores de Membranas de Ultrafiltración

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

4.2.5. Filtros Cartucho

Los Filtros Cartucho son unidades de tratamiento que sirven de protección a la ósmosis inversa. Este es el último paso del pretratamiento previo a la ósmosis. Estas unidades cuentan en su interior con un conjunto de tubos perforados cubiertos por los filtros de tipo cartucho de 5 micras de paso. El agua ingresa a la cámara del filtro y para pasar a la siguiente etapa debe atravesar los filtros cartucho con los que cuenta cada tubo perforado. Al atravesar los filtros cartucho, el agua ultrafiltrada ingresa a los tubos perforados que los llevarán a una cámara de salida donde seguirán su paso hacia el tratamiento de ósmosis inversa. La pérdida de carga en

las unidades de filtros cartucho es alrededor de 0,2-0,5 bar.

Como podemos ver, la abertura de paso de los filtros cartucho es mucho mayor que la abertura de paso generado por los bastidores de ultrafiltración, esto es debido a que los filtros cartucho son unidades de protección en caso haya alguna falla en el sistema de ultrafiltración y permita el flujo de sólidos provenientes directamente de los Filtros Malla Autolimpiantes.

En esta planta, se cuenta con cuatro filtros cartucho instalados en paralelo. El uso de 1 o más de ellos dependerá del ensuciamiento de estos y la cantidad de agua a producir.

Figura 20.

Filtro Cartucho: Estructura y cartuchos internos

Nota: Fuente: (Grupo Dimasa, 2018)

4.3. Ósmosis Inversa

Luego de que el agua ultrafiltrada atraviese los filtros cartucho, llegará hacia las unidades de ósmosis inversa con una presión de alrededor de 1,8-2,3 bar. Es necesario recordar según lo mencionado en el capítulo II que, un sistema de ósmosis inversa genera 2 productos a partir de un agua de alimentación (para nuestro caso agua ultrafiltrada): agua permeada (agua osmotizada) y salmuera (agua de rechazo). En esta planta, para que el sistema funcione, se necesita presurizar el agua de alimentación (agua ultrafiltrada) en alrededor de 57-63 bar, dependiendo de las condiciones de temperatura y conductividad del agua de alimentación. Esto generará dos productos uno de ellos será el agua permeada o agua osmotizada con alrededor de 0,4-0,5 bar de presión y el otro producto será el agua de rechazo o salmuera con aproximadamente 2-5 bar menos que la presión de ingreso a las membranas de ósmosis inversa, es decir, alrededor de 52-60 bar de presión de salida. La presión residual con la que sale la salmuera dependerá del ensuciamiento de las membranas, la temperatura y salinidad del agua.

Como podemos ver en lo descrito en el párrafo anterior, la presión residual de la salmuera es bastante alta por lo que, en esta planta se cuenta con un sistema de Recuperadores de Energía (ERI, por sus siglas en inglés) que utilizan el valor de la presión residual de la salmuera rechazada por las membranas de ósmosis inversa para hacer girar unos rotores de cerámica e impulsar agua ultrafiltrada elevando su presión hasta 50 bar de presión aproximadamente y con ayuda de una bomba booster completar la presión necesaria para ingresar al sistema de ósmosis inversa.

Por lo expuesto, el sistema de ósmosis inversa cuenta con dos líneas de ingreso que se unen previo al ingreso a las membranas de ósmosis inversa. Estas dos líneas son: línea ingreso por bomba de alta presión y línea de ingreso por sistema de Recuperadores de Energía (ERI).

En la línea de ingreso por bomba de alta presión, el agua ultrafiltrada llega con una presión entre 1,8-2,5 bar. Una primera bomba booster con variador de frecuencia adiciona a la presión de llegada del agua ultrafiltrada alrededor de 6-9 bares de presión adicionales. Este caudal de

agua ultrafiltrada con una presión de entre 8-11 bar de presión sirve de alimentación a la succión de la bomba de alta presión que tras su paso elevará hasta 58-63 bar de presión el agua ultrafiltrada, siendo este el caudal y presión de ingreso del agua ultrafiltrada hacia las membranas de ósmosis inversa aportado por la línea de ingreso por bomba de alta presión.

En la línea de ingreso por sistema de Recuperadores de Energía (ERI), el agua ultrafiltrada será impulsada inicialmente por el sistema de Recuperadores de Energía y posteriormente se completará la presión de ingreso necesaria con la ayuda de una bomba booster con variador de frecuencia, esta bomba se regulará automáticamente para alcanzar la presión del sistema establecida por la línea de ingreso por bomba de alta presión.

Es de esta forma como el agua ultrafiltrada ingresa a las membranas de ósmosis inversa, generando dos productos: agua osmotizada y agua de rechazo o salmuera. El agua osmotizada seguirá su paso hacia un tanque de almacenamiento desde donde al alcanzar su nivel de rebose continuará hacia el postratamiento de remineralización y desinfección por medio de los lechos de calcita y dosificación de hipoclorito de sodio respectivamente. El agua de rechazo o salmuera será retornada al mar mediante un emisario submarino.

Esta planta cuenta con 3 unidades de ósmosis inversa y ha sido diseñada para obtener 45% de porcentaje de recuperación y 455 m3/h de producción por unidad de ósmosis inversa. Es decir, con un caudal de aproximadamente 1010 m3/h de agua ultrafiltrada se generarán 455 m3/h de agua osmotizada y 555 m3/h de agua de rechazo o salmuera.

Es importante mencionar que, el sistema de osmosis inversa y sobre todo las bombas de alta presión cuentan con una serie de protecciones configuradas que permiten proteger a estos equipos de posibles daños ante una falla no controlada. Parte de estas protecciones está en el tiempo de espera para volver a ser encendido tras un apagado del equipo. Es decir, de haber un

apagado de las bombas de alta presión las protecciones del equipo restringen el reinicio del encendido inmediato, teniendo que esperar un tiempo mínimo de 30 minutos para volver a prender estos equipos. Esta protección se debe al calentamiento del dispositivo de arranque del equipo “SoftStarter” cuyo tiempo de espera es necesario para poder estabilizarse y regular su temperatura para poder estar listo para un nuevo proceso de encendido.

Figura 21.

Sistema de Ósmosis Inversa

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

4.4. Postratamiento

Como se explicó anteriormente, el agua osmotizada es un agua corrosiva ya que las membranas de ósmosis inversa han removido casi la totalidad de las sales del agua. Para ello es necesario remineralizar el agua para poder ser apta para consumo humano y desinfectarla con un efecto residual para potabilizarla.

4.4.1. Lechos de Calcita

El agua osmotizada proveniente del sistema de ósmosis inversa vendrá a través de tuberías donde en un punto previo al ingreso de Lechos de calcita se dosificará Dióxido de Carbono. Esta agua osmotizada con CO2 ingresará por la parte inferior de los lechos de calcita, generando un flujo ascendente el mismo que al entrar en contacto con la calcita (carbonato de calcio) generarán bicarbonatos remineralizando el agua osmotizada según la reacción química de remineralización por CO2 indicada en el punto 2.4.3. de este trabajo.

Posteriormente, al llegar el agua al nivel del vertedero de rebose saldrá conducida por un sistema de tuberías que recogerán el agua remineralizada de los 4 lechos de calcita con los que cuenta esta planta.

Figura 22.

Lechos de Calcita – Tubos difusores interiores

Nota: Fuente (ISA PROYECTOS Y MONTAJES, 2018)

4.4.2. Desinfección

Luego de su paso por los lechos de calcita, el agua remineralizada será conducida en un

arreglo de tuberías donde se inyectará hipoclorito de sodio manteniendo un residual de cloro en el agua y generando de esta forma agua potable para consumo humano.

4.5. Unidades de Proceso Complementarias

Las unidades de proceso complementarias son aquellas que no son utilizadas como parte directamente relacionada a la producción de agua potable, pero son necesarias para el tratamiento de efluentes y limpiezas de membranas.

4.5.1. Tanque de Retrolavado y Limpiezas de Recuperación - Ultrafiltración

Como se mencionó anteriormente en el punto 3.1.4. Ultrafiltración, los bastidores de ultrafiltración cuentan con limpiezas realizadas durante los tiempos de lavado, ya sea mediante el uso de agua ultrafiltrada y aire o, de ser necesario, aire, agua ultrafiltrada y cloro (Limpiezas de mantenimiento). Sin embargo, en ocasiones el ensuciamiento de las membranas ha sido tal que los tiempos de lavado y las limpiezas de mantenimiento no son suficientes para poder normalizar las pérdidas de carga y los flujos de producción a través de las membranas de ultrafiltración. En estos casos, se realizan las limpiezas de recuperación.

Las limpiezas de recuperación consisten en dosificar una solución de insumos químicos recomendados por los fabricantes de la membrana utilizada a las dosis, temperaturas y rangos de pH indicados en los manuales de mantenimiento de las membranas proporcionados.

Para esta planta, en los manuales de mantenimiento se recomiendan los siguientes productos químicos

Tabla 9

Productos Químicos de Limpiezas de Recuperación Recomendados

Producto Químico	Concentración recomendada (ppm)	pH recomendado	Tipo de Limpieza
Hipoclorito de Sodio	1000	-	Biocida
Hidróxido de Sodio	3500	12-12,5	Alcalina
Ácido Sulfúrico	5000	1,5-2	Ácida
Ácido Clorhídrico	5000	1,5-2	Ácida
Ácido Cítrico	10000-20000	1,5-2	Ácida

Nota: Fuente (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB340.04, 2018)

La selección de los productos químicos dependerá del tipo de contaminantes con los que hayan sido saturadas las membranas, disponibilidad del producto, medios de dosificación disponibles en la planta y el costo/beneficio obtenido.

Una vez definido el producto a utilizar en la solución de limpieza, es necesario calentar el agua en el tanque de retrolavado a la temperatura recomendada por el fabricante (usualmente entre 30-40°C), este tanque almacena parte del agua ultrafiltrada producida y cuenta con dos resistencias calefactoras capaces de calentar el agua en su interior. Asimismo, cuenta con puntos de dosificación de insumos químicos donde según lo indicado en la Tabla 6 y en conocimiento del manual de mantenimiento, se dosificarán los productos químicos para las limpiezas necesarias.

Luego de tener lista la solución de limpieza química, se procede a colocarla en las membranas de ultrafiltración, mediante un accionamiento de válvulas. El proceso consiste en dejar en remojo las membranas de ultrafiltración con la solución de limpieza durante 1 hora. Luego de ello, se inyectará aire de lavado para ayudar a la solución a remover los sólidos depositados en las membranas. Hasta este punto, la solución de limpieza ya habrá descendido su temperatura por lo que será necesario cambiarla con la solución a temperatura correcta

presente en el tanque de retrolavado, posteriormente, se volverá a dejar en remojo durante 1 hora más. Luego de transcurrido este último periodo, se drenará la solución de limpieza y se enjuagarán las membranas mediante un retrolavado con agua ultrafiltrada hasta que el pH de salida del agua después de las membranas sea el mismo que el de ingreso.

Una buena limpieza de recuperación restablecerá los valores de presión transmembránica, flujo y permeado a 20°C a la normalidad. En caso de no hacerlo, será un indicador de una mala ejecución de limpieza debido a una mala selección de los productos químicos, mala dosificación o alguna falla en la inyección de aire de lavado. Los fabricantes de membranas usualmente recomiendan para una recuperación completa de las membranas de ultrafiltración realizar dos tipos de limpiezas: limpieza alcalina con cloro y limpieza ácida.

Figura 23.

Tanque de Retrolavado para Limpiezas Químicas

Nota: Fuente (Elaboración Propia)

4.5.2. Tanque de Lavado de Membranas de Ósmosis Inversa

En el sistema de ósmosis inversa no es común un ensuciamiento brusco donde se perciba un aumento significativo del diferencial de presión de un momento a otro y sobre todo en una planta como esta debido a todo el proceso de pretratamiento y protecciones previas con las que cuenta. Sin embargo, existen fallas operacionales y condiciones atípicas del agua de mar que podrían ocasionar un ensuciamiento de membranas de ósmosis inversa. Para estos casos, se hace necesaria una limpieza química de membranas.

A diferencia de las unidades de ultrafiltración, una membrana de ósmosis inversa genera 2 productos con caudales importantes de aporte: agua osmotizada y salmuera. Para el caso de membranas de ósmosis inversa las limpiezas que se llevan a cabo son mediante un sistema CIP (Cleaning in Place). Este sistema es básicamente un circuito cerrado donde una solución de limpieza sale de un tanque de preparación (tanque de lavado de membranas) por medio de bombas pasando primero por un filtro cartucho y a continuación, atravesando las membranas como caudal de alimentación para posteriormente retornar al tanque inicial direccionando las dos salidas (agua permeada y salmuera) hacia el tanque de preparación. Este ciclo se repite durante el tiempo que se considere necesario alternando entre tiempos de reposo de la solución dentro de las membranas y tiempos de recirculación en el circuito cerrado mencionado. Los tiempos de reposo (remojo) y recirculación serán determinados en un primer lavado analizando lo calidad del agua recirculada turbidez, pH, conductividad, etc. Deberán encontrarse los tiempos en los cuales estos parámetros se llegan a estabilizar y en función de ellos se diseñará un protocolo de limpieza para las membranas.

El sistema de limpieza CIP de osmosis inversa cuenta con un Tanque de Lavado de Membranas, resistencias calefactoras, bombas de recirculación, filtro cartucho de sistema CIP, tuberías y válvulas que direccionan el flujo hacia el tanque y hacen posible la recirculación sin

perjudicar al sistema de producción.

Al igual que en las membranas de ultrafiltración, los productos químicos a utilizar en este tipo de limpiezas, las temperaturas, los rangos de pH, caudales y presiones de recirculación deberán de ser los que indique el fabricante de membranas en su manual de mantenimiento.

En esta planta, el fabricante de membranas recomienda los siguientes productos de limpieza (cantidades aplicables a 379 litros de solución):

Tabla 10

Recetas de soluciones de limpieza recomendadas por el fabricante.

Solución de Limpieza	Productos	Cantidad	Ajuste de pH	Temperaturas
1	Ácido Cítrico (Como polvo al 100%)	7,7 kg	No se requiere ajuste de pH	40°C
2	STPP (Tripolifosfato de sodio, como polvo al 100%) Na-EDTA (Versene 220 o similar, como polvo al 100%)	7,7 kg 3,18 kg	Ajustar a pH 10 con ácido sulfúrico o clorhídrico	40°C
3	STPP (Tripolifosfato de sodio, como polvo al 100%) Na-DDBS (Sal sódica del ácido dodecil benceno sulfónico)	7,7 kg 0,1 kg	Ajustar a pH 10 con ácido sulfúrico o clorhídrico	40°C
4	HCl (Ácido Clorhídrico, líquido al 36%)	1,78 litros	Ajustar lentamente el pH a 2,5 con HCl. Para subir el pH usar hidróxido sódico	35°C
5	Hidrosulfito de Sodio (Como polvo al 100%)	3,86 kg	No se requiere ajuste de pH	35°C

6	NaOH (Hidróxido de sodio, como polvo al 100%)	0,38 kg	Ajustar lentamente el pH a 11,5 con hidróxido sódico o ácido clorhídrico según sea el pH.	30°C
	SDS (Dodecilsulfato de sodio)	0,11 kg		
7	NaOH (Hidróxido de sodio, como polvo al 100%)	0,38 kg	Ajustar lentamente el pH a 11,5 con hidróxido sódico o ácido clorhídrico según sea el pH.	30°C

Nota: Fuente (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

La selección de la solución de limpieza a utilizar será en función de los contaminantes que hayan podido ingresar a las membranas, según lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 11

Soluciones de limpieza recomendadas según el tipo de contaminante

Contaminante	Solución de Limpieza Tradicional	Solución de Limpieza Agresiva
Precipitaciones de Carbonato de Calcio	1	4
Precipitaciones de sulfatos de calcio, bario y estroncio	2	4
Óxidos metálicos e hidróxidos	1	5
Contaminantes coloidales inorgánicos	1	4
Contaminantes coloidales mezclados inorgánicos/orgánicos	2	6
Recubrimiento de sílice polimerizado	-	7
Materia biológica	2 o 3	6
Materia orgánica natural	2 o 3	6

Nota: Fuente (Hydranautics, Boletín de Servicio Técnico TSB107.25, 2017)

Figura 24.

Tanque de Lavado de Membranas de Ósmosis Inversa – Limpiezas CIP

Nota: Fuente (Elaboración Propia).

4.6. Arranque de Planta: Secuencia de Encendido de Equipos y Unidades de la Planta Desalinizadora

Es necesario entender que el proceso de arranque de planta consta de la habilitación de los procesos, equipos y unidades previamente descritos en este capítulo. Sin embargo, el encendido de los equipos y unidades depende de ciertas condiciones operacionales que deberán cumplirse en cada unidad o equipo para poder dar paso al encendido de la siguiente unidad o equipo. A continuación, se describirán la secuencia de pasos de arranque de la planta desalinizadora de referencia para este trabajo.

El primer paso será el encendido de las bombas que traerán consigo al agua de mar y aportarán el caudal de ingreso a la planta. El agua de mar ingresará a la primera unidad de tratamiento, el sistema DAF. Para ello es necesario colocar todos los sistemas de presurización

de aire en línea, sistema de arrastre de flotantes, sistemas de dosificación y sistemas de agitación de ser necesarios. Al pasar por el sistema DAF, se obtendrá un agua clarificada, sin embargo, como es de esperarse luego de una parada de planta, el estado de reposo del agua en las unidades ha favorecido a la sedimentación de partículas por lo que, un ingreso de caudal producirá una mezcla de las partículas sedimentadas provocando un aumento en la turbidez del agua clarificada, este efecto se verá reflejado en los Filtros Malla Autolimpiantes.

Luego de ello, el agua clarificada pasará hacia el sistema de filtración gracias al bombeo realizado en el cuarto de bombas de agua clarificada. Como se mencionó, los primeros flujos de agua llevarán consigo una turbidez elevada lo que ocasionará que los Filtros Malla Autolimpiantes se ensucien más rápidamente y el automatismo de estos equipos hará que su sistema de limpieza se active a cada momento, esto producirá pequeñas variaciones en las presiones del sistema cuando los filtros ingresen a su lavado automático. Normalmente, luego de unos 30 minutos suelen estabilizarse estas limpiezas y normalizar los intervalos de tiempo entre lavados. Asimismo, al iniciar nuevamente la presurización del sistema por medio de las bombas de agua clarificada, se contará con válvulas de aire por donde se eliminará la presencia de aire en las tuberías. No obstante, el aire también llegará a los sensores de analíticas en línea produciendo valores erróneos de los parámetros operativos visualizados en el sistema SCADA debido a la presencia de aire en forma de burbujas. Tomará un tiempo similar al anterior mencionado para que se estabilicen las lecturas.

Luego de haber iniciado el encendido y puesta en línea de los filtros malla Autolimpiantes, tocará colocar en servicio a los bastidores de ultrafiltración. Para ello, será necesario regular el porcentaje de frecuencia de los variadores de las bombas de agua clarificada. Con esto, se podrá regular el caudal de ingreso a las unidades de ultrafiltración según la cantidad de bastidores que vayan ingresando en servicio. Esto deberá realizarse de manera controlada permitiendo que se alcance de manera correcta un equilibrio de presiones y caudales entre las unidades en servicio

y las que están por entrar en servicio para su ciclo de filtrado (la importancia y el detalle de cómo controlar este paso se explicará en el siguiente capítulo). Posteriormente, luego de haber colocado en línea los bastidores de ultrafiltración el agua ultrafiltrada ingresará a través de los filtros cartucho y será derivada momentáneamente hacia las afueras de la planta, sin aún poder ingresar a las membranas de ósmosis inversa.

El agua ultrafiltrada debe de ser analizada previamente para poder continuar con el siguiente proceso de ósmosis inversa. Para ello, se deben validar los parámetros de SDI, potencial redox y turbidez. Asimismo, será necesario validar la calibración de los sensores analíticos que reflejan estos parámetros mencionados hacia el sistema SCADA con lecturas continuas.

Es necesario un valor de SDI menor a 3 para poder habilitar el paso hacia las membranas de ósmosis inversa. Normalmente, durante los inicios de producción de agua ultrafiltrada el SDI suele salir con valores elevados, debido a un fenómeno de sedimentación similar al ocurrido en el sistema DAF pero esta vez en el interior de las tuberías, debido al agua en reposo. La lectura del valor del SDI toma como mínimo 15-20 minutos, debido al procedimiento de lectura del mismo. En caso este valor salga elevado, lo más probable será que sea debido a la presencia de aire y ensuciamiento por la sedimentación durante la parada de planta así que se deberá esperar hasta que este valor disminuya y se estabilice. Este proceso suele demorar normalmente entre 30-40 minutos. Además, el valor del potencial redox deberá ser controlado mediante la dosificación de bisulfito de sodio si es que se encuentra en un valor elevado. En caso de no encontrar una disminución del SDI, deberá de revisarse alguna falla en los procesos previos.

Una vez validado el valor del SDI y controlado el potencial redox, podrá habilitarse el siguiente proceso de ósmosis inversa. Para ello, debido a la propia configuración del encendido

de esta unidad se empezará permitiendo el pase del agua ultrafiltrada hacia las dos líneas de ingreso descritas en este capítulo. A continuación, se encenderá progresivamente mediante su variador de frecuencia la bomba booster de agua de los recuperadores de energía. Esta bomba deberá alcanzar el caudal de agua de rechazo o salmuera configurado para poder dar paso al encendido del siguiente equipo.

El siguiente equipo en encender será la bomba booster de alta presión, una vez arrancada, una válvula motorizada regulará el flujo aguas abajo para posteriormente arrancar la bomba de alta presión. Esta válvula regulará el flujo de ingreso a la bomba de alta presión, paralelamente, será necesario aumentar el variador de frecuencia de la bomba de agua clarificada para compensar el flujo y perdida de carga generados por el encendido de la bomba de alta presión. Se deberá controlar la bomba de agua clarificada constantemente hasta que el sistema de ósmosis inversa alcance su valor configurado de caudal de producción de agua osmotizada y caudal de agua de rechazo. Todo este proceso puede tomar alrededor de 30-40 minutos normalmente.

Luego de ello, el agua osmotizada viajará en una tubería con inyección de dióxido de carbono para llegar a los lechos de calcita a ser remineralizada. En estas unidades también ocurrirán los fenómenos de sedimentación durante las paradas de planta por lo que al ingresar nuevamente un caudal de agua osmotizada se generará una especie de lavado de los lechos de calcitas, removiendo el material sedimentado y generando turbidez elevada durante unos minutos. Los valores de turbidez obtenidos durante el inicio de puesta en servicio de los lechos de calcita son elevados respecto a lo esperado y exigido para este tipo de plantas, por lo que no podrán ingresar como caudal de producción de agua potable hasta que su turbidez haya disminuido. Una vez que los valores de turbidez se hayan normalizado, se iniciará la dosificación de cloro y se derivará hacia los tanques de almacenamiento de agua potable. Este último proceso suele tomar aproximadamente 30 minutos.

Capítulo V. Principales problemas/eventos ocurridos durante la puesta en marcha y operación - propuesta de soluciones operativas

5.1. Ciclos de lavado - Tiempos de apertura y cierre de válvulas

Como se explicó anteriormente, el ciclo de filtrado de los bastidores de ultrafiltración consta de un tiempo de filtrado y un tiempo de lavado como limpieza de mantenimiento durante la operación y producción de la planta. Es justo por ello que no es posible el arranque de planta con un solo bastidor de ultrafiltración, ya que siempre será necesario que cada cierto tiempo el bastidor que se encuentre en funcionamiento tenga un tiempo de lavado y debe de haber algunas unidades de ultrafiltración de respaldo que mantengan la producción de agua ultrafiltrada y con ello la continuidad del proceso.

Sin embargo, durante la producción de agua potable, los bastidores de ultrafiltración entran y salen de servicio constantemente para sus tiempos de lavado mediante la apertura y cierre de válvulas neumáticas y este es precisamente uno de los principales problemas que suele tenerse en las fases de puesta en marcha y de operación, el riesgo de paradas de planta debido a una despresurización rápida del sistema por un tiempo de apertura o cierre muy rápido o muy lento, de acuerdo a la función de las válvulas.

Según lo explicado en los capítulos anteriores, el tiempo de lavado de un bastidor de ultrafiltración inicia con el cierre de válvula de ingreso y drenado del bastidor, y culmina con recarga del bastidor con agua ultrafiltrada y apertura de válvula de ingreso. Estos dos momentos son los que hacen a las unidades susceptibles a fallas que podrían ocasionar una parada de planta, como se explica a continuación:

Durante el inicio del ciclo de lavado, debe de garantizarse que la válvula de ingreso a los bastidores cierre a tiempo y de forma completa. Ya que, de no haber cerrado a tiempo o de forma completa, cuando inicie el drenado del bastidor ocurrirá una caída intempestiva de presión propia

de la despresurización y vaciado del bastidor que, al estar comunicado con el sistema por un mal cierre de la válvula de ingreso, provocará una despresurización de todo el sistema desequilibrándolo y pudiendo originar una parada de planta al no garantizar las presiones necesarias aguas abajo de las unidades de ultrafiltración.

Durante el fin del ciclo de lavado, el bastidor se recarga con agua ultrafiltrada para que al entrar en operación e integrarse al sistema nuevamente, no ocasione una pérdida de presión importante por encontrar al bastidor vacío. Sin embargo, esta recarga se realizará correctamente siempre que la válvula de recarga se aperture a tiempo de modo que permita a las bombas de retrolavado recargar y presurizar el bastidor de ultrafiltración a tiempo. Asimismo, es necesario que luego de recargar el bastidor, la válvula de ingreso de la unidad recién lavada se aperture de manera lenta y progresiva permitiendo así una ecualización de presiones de forma natural y progresiva.

Para poder garantizar estas aperturas y cierres rápidos o lentos (según sea la función de la válvula), puede regularse mediante el tablero de control neumático ajustando los tiempos de apertura y cierre evaluando cada caso según sea la posición y función de cada válvula.

Asimismo, como en el punto anterior, es necesario garantizar el mantenimiento de los sistemas que accionen las válvulas neumáticas para asegurar de esta forma una adecuada operación.

5.2. Sincronización de presiones y caudales

En la planta desalinizadora tomada como referencia en este trabajo, muchos de los procesos se encuentran en serie dependiendo uno del otro para su funcionamiento.

En el proceso de ultrafiltración, es necesario el funcionamiento de más de 1 bastidor de

ultrafiltración para poder operar con normalidad, debido a los tiempos de lavado y tiempos de filtrado explicados en el capítulo anterior. Dicho esto, el principal problema respecto a este tema durante la fase de puesta en marcha (previa a la fase de operación y mantenimiento) y durante los arranques de planta dentro de la operación y mantenimiento es cuando debemos ingresar una nueva unidad de ultrafiltración en simultaneo con otra que se encuentra ya en proceso de filtrado. Como es de esperarse, al aperturar las válvulas que permiten el ingreso a la nueva unidad de ultrafiltración el agua de alimentación tiene la tendencia de ir hacia el lugar con menor resistencia, es decir, ir hacia la nueva unidad de ultrafiltración que recién iniciará su proceso de filtrado. Esta tendencia, ocasiona que la unidad que se encontraba en etapa de filtrado pierda caudal y presión, ocasionando una falla en el sistema al no contar con el caudal y presión mínima necesaria generando un desequilibrio en las presiones y caudales aguas abajo del proceso de ultrafiltración pudiendo ocasionar una parada completa de planta si no se controla a tiempo. Además de eso, el ensuciamiento de cada bastidor de ultrafiltración no es necesariamente igual u homogéneo. Suele darse el caso que, alguno de los bastidores de ultrafiltración esté más limpio o sucio que otros generando una pérdida de carga diferente respecto a los demás y consecuentemente haciendo que el caudal de ingreso sea diferente en los demás, forzando en algunos casos que pase más caudal unitario por membrana que el diseñado, siendo un importante factor a considerar para no acortar la vida útil de la membrana innecesariamente o dañarla.

Asimismo, otro de los problemas típicos durante la fase de puesta en marcha y los arranques de planta en la fase operación son los ocasionados por el encendido de la bomba de alta presión que forma parte del proceso de ósmosis inversa. Esta bomba cuenta con una capacidad de bombeo de 455 m^3/h y eleva su presión de ingreso de 10 bar hasta 60 bar aproximadamente. Por ello, el arranque de esta bomba para poder iniciar el proceso de ósmosis inversa demanda de grandes caudales y presiones ocasionando que aguas arriba se tenga una

fuerte disminución en los caudales y presiones de los procesos previos, pudiendo ocasionar que la bomba de alta presión no llegue a encender de no controlar el sistema a tiempo.

Para estos eventos, durante la fase de puesta en marcha se optó por acondicionar válvulas proporcionales neumáticas enlazadas con el sistema SCADA con señales de retroaviso y programadas para abrirse o cerrarse gradualmente según la necesidad. Por ejemplo, para el caso de una nueva unidad de ultrafiltración la apertura debe de ser lenta y permitir el aumento de caudal progresivamente hasta estabilizar sus presiones y caudales con las del sistema. Por otro lado, para el caso de unidades de ultrafiltración que se encuentren operando, la programación hecha sobre las válvulas proporcionales es tal que en función del caudal registrado reciban una señal de retroaviso que les permita abrirse o cerrarse con la finalidad de mantener un equilibrio de caudales en todos los bastidores de ultrafiltración operativos.

En el caso del proceso de ósmosis inversa, la caída de presión y flujo producida por el arranque de la bomba de alta presión es compensada por la instalación de una válvula motorizada que pueda abrirse o cerrarse proporcionalmente, análogamente a lo realizado en las unidades de ultrafiltración, pero con la fuerza suficiente para resistir las altas presiones que se generan en las inmediaciones de la bomba de alta presión.

Finalmente, es necesario también controlar el proceso desde el inicio de su presurización, es decir, mediante la regulación de la bomba de agua clarificada a través de su variador de frecuencia. De esta forma podemos controlar y compensar presiones y caudales en la línea aumentando o disminuyendo su frecuencia.

Es importante realizar el mantenimiento necesario para que el funcionamiento de estas válvulas se mantenga completamente disponible, ya que una falla por ensuciamiento de líneas neumáticas falla en el sistema de aire para instrumentación, válvulas descalibradas o

componentes internos sucios, transmisión de señales, entre otros, puede ocasionar una mala regulación de las válvulas en mención y ocasionar fallas en la operación.

Además, es un factor determinante que el operador del sistema SCADA tenga la capacidad de poder detectar y controlar a tiempo las caídas de presión propias del encendido de la bomba de alta presión. Esto se logra detectando la caída de presión con un monitoreo constante y aumentando el porcentaje de frecuencia de los variadores de las bombas de agua clarificada para equilibrar el sistema.

5.3. Falla en el encendido de válvulas y equipos - Señales de retroaviso.

Como parte de la protección de los equipos, un sistema SCADA cuenta con múltiples permisivos necesarios para el accionamiento de ciertas unidades y equipos importantes. Por ejemplo, para permitir el accionamiento de una bomba es necesario que el sistema detecte un nivel mínimo de agua de tal forma que descarte la posibilidad de que una bomba funcione en vacío, por las consecuencias dañinas para el equipo que esto implica. Y así como este ejemplo, muchos de los equipos se encuentran enlazados a señales condicionales o permisivas mínimas para poder funcionar.

Por lo dicho, es necesario revisar las señales de retroaviso o de confirmación para que los equipos se encuentren realmente protegidos ante alguna falla en la operación y también evitar paradas de planta por una mala lectura de las señales de confirmación.

Este tipo de problemas suelen ser en su mayoría por algún cable mal ajustado que está dando una lectura errónea, sensores o límites de carrera averiados, entre otros. Por lo que, para prevenir fallas operativas a causa de estos problemas, es necesario realizar un mantenimiento frecuente a las señales de confirmación de todos los procesos de la planta.

5.4. Configuración de parámetros de encendido en equipos

Existen dos tipos de encendido más comunes dentro de un sistema de bombeo, con variador de frecuencia o con sistema de arranque directo. Los sistemas con variador de frecuencia pueden regularse para poder encenderse progresivamente. Por otro lado, los sistemas de arranque directo cuentan con una curva de arranque usualmente configurable con tiempos, límites de corriente y voltaje pico previamente dimensionados para el equipo.

Durante la fase de puesta en marcha, la mala configuración del encendido de equipos ya sea mediante sistema de arranque directo o con variador de frecuencia originó muchos problemas en tuberías y accesorios, generando fugas en algunos puntos, daño de empaquetaduras, entre otros. Esto fue corregido mediante la configuración correcta de curvas de encendido de las bombas configuradas dentro del sistema de arranque directo o del variador de frecuencia, de esta forma se logró controlar las fallas por este tipo de problemas.

Sin embargo, es posible que, luego de un bloqueo de equipos para intervención de los trabajadores o desenergizado total de un equipo, su configuración sea reiniciada siendo necesario una actualización de sus parámetros para el encendido de este. Este tipo de problemas se tuvo durante la etapa de operación y mantenimiento, ya que como medida de seguridad fue necesario la desenergización de algunos equipos para realizar los mantenimientos preventivos necesarios y al restablecerlos, se observó el reinicio de ciertas configuraciones por lo que tuvieron que volver a cargarse o configurar los parámetros de encendido y así evitar problemas como los mencionados anteriormente.

5.5. Corrosión.

Este es un problema que empezó a notarse durante la etapa de operación y mantenimiento. La mayoría de las piezas metálicas comenzaron a oxidarse y corroerse a los

meses de haber iniciado la operación. Esto es indiscutiblemente generado por el agua de mar que al entrar en contacto con el metal y su alto grado de salinidad deterioran la superficie y de no ser detectado a tiempo puede dañar irreparablemente las piezas metálicas.

Para prever estos eventos, se optó por la remoción de óxido y pintado con pintura epóxica protegiendo así a todo aquello que pueda entrar en contacto con el agua de mar por salpicadura y cuyo diseño no sea para contacto directo de agua de mar. En el caso de la pernería de planta, se optó por la aplicación de grasa sobre los pernos, esto ha venido funcionando bastante bien hasta el día de hoy.

Es importante mantener la planta libre de óxido ya que debilita o daña cualquier estructura importante, desde pernos oxidado hasta válvulas, piezas de equipos y demás estructuras metálicas. Es recomendable planificar campañas de limpieza de oxido cada cierto tiempo ya que el ambiente marino que se experimenta es corrosivo.

5.6. Llaves térmicas y guardamotores

Aunque parezca extraño el mencionar este tipo de errores, es común encontrarse con este tipo de problemas cuando se realiza el cambio de etapa de puesta en marcha a la etapa de operación como tal.

Algunos de los problemas que pueden tenerse a menudo son ocasionados por un mal dimensionamiento de las llaves de protección o guardamotores o, por errores durante el montaje de los tableros eléctricos. Como se sabe, todos los equipos cuentan con una corriente o voltaje nominal de diseño, este dato viene indicado desde la ficha técnica del fabricante e incluso escrito en la placa de identificación de cada equipo y puede ser contrastado en campo fácilmente con instrumentos de medición. Suele pasar con cierta frecuencia que, los guardamotores o llaves de

protección se encuentren por debajo o muy cercano al valor de corriente nominal indicado por el fabricante haciendo que ante un pico de corriente o voltaje se activen rápidamente detectando su valor de apertura y abriendo el circuito para proteger al equipo y motor de daños mayores. Sin embargo, al encontrarse dentro del rango normal esperado el equipo no corre riesgo de daño sino simplemente es que la llave o guardamotor ha sido mal dimensionada y seleccionada o, mal colocada durante el montaje ocasionando una falla por protección innecesaria.

Por el contrario, también es posible que estas llaves o guardamotores se encuentren sobredimensionados o que por error de montaje se hayan colocado equivocadamente. Es decir, interruptores cuyo valor de apertura configurado para proteger al equipo sea demasiado alto y alejado del valor nominal recomendado por el fabricante. Estos errores harán que el motor no tenga ningún tipo de protección y ante un evento de sobreesfuerzo el motor continúe funcionando, recalentándose y muy probablemente quemándose si no es detectado a tiempo.

Para evitar este tipo de problemas, no se tiene otra solución más que realizar un registro general de los equipos existentes en planta y contrastar las protecciones con las que estos cuentan.

5.7. Configuraciones de parámetros eléctricos

Otro de los problemas que suelen suceder en este tipo de plantas al contar con tantos equipos, es la desconfiguración de los parámetros eléctricos.

Por buenas prácticas de seguridad, ante un mantenimiento de cualquier tipo es necesario que se realice el bloqueo del equipo a intervenir desde su tablero de accionamiento o incluso a veces desenergizándolo por completo. Esto conlleva a que, en ocasiones, no todos los equipos carguen automáticamente su configuración anterior haciendo que, de no actualizar sus

parámetros, el siguiente encendido del equipo sea de manera diferente pudiendo ocasionar fallas que probablemente antes ya hayan sido solucionadas.

Por ejemplo, puede darse el caso de que ante un mantenimiento de algún motor con variador de frecuencia tanto motor como variador sean apagados o desenergizados y que al volver a entrar en operación se reinicie el porcentaje de frecuencia suministrada al motor a su valor por defecto, lo que a lo largo del tiempo, si esta frecuencia se encuentra por debajo del límite indicado por el fabricante del motor terminará sobrecalentándose y quemándolo por no haber configurado nuevamente sus parámetros eléctricos de operación.

Para evitar este tipo de fallas, es una buena práctica el mantener un registro de los parámetros eléctricos configurados previos al desenergizado del equipo para de esta forma poder corroborar o configurarlo de ser necesario antes de colocarlo en servicio nuevamente.

5.8. Hermeticidad de válvulas.

En esta planta desalinizadora se cuenta con muchas válvulas de una gran variedad de tipos, el problema radica en si alguna de las válvulas importantes que separan un tratamiento de otro no se encuentra hermetizando correctamente. Por ejemplo, dentro del proceso de ósmosis inversa, se cuenta con una gran variedad de válvulas como la válvula que separa el caudal de salmuera con el caudal de alimentación. Una mala hermeticidad de esta válvula puede ocasionar una fuga interna que mezcle el agua de salmuera con el agua de alimentación. Este tipo de fugas y filtraciones son indetectables a la vista ya que la mezcla se produce confinada en la tubería, sin embargo, es posible encontrar y detectar estas fugas descartando y analizando otros parámetros en conjunto.

Este tipo de fallas en los cierres herméticos de las válvulas puede ocasionar que todo el

tratamiento de desalación se vea afectado o disminuir la eficiencia del tratamiento como por ejemplo, ensuciamiento rápido de membranas, daño estructural de membranas, obstrucción de equipos, mayores presiones de trabajo, mayor consumo energético, obstrucción de los recuperadores de energía, entre otros.

Una mala hermeticidad de válvulas dentro de un mismo proceso de tratamiento puede ser evaluada conociendo los parámetros típicos de cada etapa del proceso. Por ejemplo, una fuga dentro del proceso de ultrafiltración puede ser fácilmente detectable analizando las presiones y valores de turbidez existentes en las líneas. Se sabe que las presiones de los 3 componentes de ultrafiltración (alimentación, concentrado, permeado) decrece progresivamente, es decir, $P_{alimentación} > P_{concentrado} > P_{permeado}$, por lo que una variación en el orden progresivo de estas presiones indicaría una posible filtración y mezcla de alguna de las etapas (o alguna falla de los transmisores de presión la cual debe ser descartada en primera instancia mediante un manómetro o calibración del transmisor). Descartando la falla por lectura de transmisor, podemos continuar encontrando el punto de origen analizando su calidad ya que, el agua antes y después de la ultrafiltración tiene valores de turbidez conocidos y analizando diferentes puntos del proceso podemos encontrar la válvula que se encuentra dando errores por hermeticidad.

Este tipo de descartes puede ser realizado en diferentes procesos y unidades de tratamiento para encontrar la válvula que origina el problema y solucionar la falla.

Para poder controlar estas fallas, es necesario el monitoreo y control constante de los valores leídos por los instrumentos por parte de los operadores de planta, así como conocer claramente los valores típicos en cada proceso de desalación permitiendo detectar a tiempo un valor anómalo durante el funcionamiento de la planta.

5.9. Presurización de líneas de aire seco para válvulas neumáticas.

La automatización de la planta depende, entre otras cosas, del cierre y apertura en tiempo y forma de las válvulas neumáticas. Estas hacen posible que los procesos de tratamiento funcionen según el operador lo requiera. Sin embargo, la automatización de estas válvulas depende de la programación asignada en el centro de control, las señales de retroaviso y del mecanismo de accionamiento que en su mayoría es mediante accionamiento neumático.

Por ello es de suma importancia el mantenimiento y monitoreo constante del sistema de aire seco que acciona las válvulas neumáticas, ya que una falla en este sistema ocasionaría que todas las válvulas gobernadas por este sistema fallen, haciendo imposible el funcionamiento de los procesos de tratamiento y con ello la producción de agua potable.

Las acciones comunes que se deben prever en el sistema de aire seco para evitar las fallas son el mantenimiento de compresores, mantenimiento de secadores, monitoreo de presiones en tanque neumático, mantenimiento de tableros de control neumáticos, verificación de fugas, protección del sistema de humedad y/o intrusión de agua.

En la experiencia, se ha podido observar que el control en conjunto de lo señalado anteriormente permitirá prever y garantizar un funcionamiento adecuado del sistema de accionamiento neumático necesario para las válvulas automatizadas.

5.10. Ensuciamiento de membranas por limpiezas de mantenimiento

El ensuciamiento intempestivo de las membranas puede darse por causas naturales debido a la variación de la calidad del agua de mar que ingresa a planta o por mala ejecución de los procedimientos operativos durante el arranque y producción de la planta. Cabe precisar que, el ensuciamiento de las membranas es un proceso habitual dentro de la operación, pero este

ensuciamiento suele darse gradualmente en el tiempo y no de un momento a otro. En este punto, hablaremos de los ensuciamientos intempestivos ocasionados por una mala operación en alguna de las unidades.

Una de las causas que podría originar el ensuciamiento de membranas y filtros es la mala puesta en servicio de las unidades de pretratamiento luego de un mantenimiento general de las pozas o arquetas. Cuando se realiza un mantenimiento de limpieza general de las pozas que reciben el agua de mar es necesario drenarlas por completo para que el personal, con ayuda de herramientas para limpieza, puedan remover toda la vida marina que allí se pueda formar. Al tener un agua de alimentación proveniente del mar, suele formarse vida marina en las pozas de pretratamiento con presencia de algas marinas, conchas de mar, entre otros. Las limpiezas necesarias incluyen la remoción de lo indicado anteriormente, así como del lodo sedimentado en el fondo de la poza. Este lodo al ser removido, aun realizando la limpieza, siempre deja rastros de sedimentos que generan alta turbidez y partículas pequeñas que deben ser removidas por arrastre hacia afuera de la planta. El problema radica cuando se coloca en servicio la unidad recién limpiada y se omite el paso de eliminar por arrastre las partículas residuales de la limpieza, esto genera que el agua de alimentación para el siguiente proceso vaya con una elevada carga de turbidez saturando los filtros y membranas provocando un ensuciamiento por una mala maniobra durante la puesta en servicio. En el caso de los filtros malla autolimpiantes esta falla se ve debido al aumento de la pérdida de presión antes y después del mismo, y en las unidades de ultrafiltración el ensuciamiento puede verse al aumentar la presión transmembránica y disminuir la permeabilidad a 20°C.

Para evitar este tipo de ensuciamientos, se debe de tener en claro que las pozas o arquetas deben de dejar correr el agua por un tiempo de tal forma que permita el arrastre de las partículas residuales ocasionadas por la limpieza. Este caudal de arrastre debe de ser enviado

fuera de planta y debe evitarse en todo momento que ingrese a alguno de los equipos que continúan el proceso alineando hacia la línea de bypass. Se restablecerá el alineamiento normal hacia producción cuando se tengan las lecturas de turbidez habituales durante la operación.

Este mismo problema puede ser ocasionado por un aumento de caudal en la línea de impulsión que viene desde la captación de agua de mar. Al aumentar el caudal de la línea por accionamiento de 2 o 3 bombas en simultáneo, este flujo se comportará como un sistema de arrastre que llevará consigo hasta el ingreso a planta todo lo que pueda estar adherido a las paredes interiores de la línea de impulsión. Esto llevará a un aumento temporal en la turbidez de ingreso a planta por lo que deberá de evaluarse el dirigir temporalmente el flujo hacia las afueras de planta hasta su estabilización u operar bajo esas condiciones con la adición de reactivos que permitan la remoción de esas partículas momentáneas.

5.11. Saturación de membranas de ósmosis inversa

El ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa, como cualquier otra membrana, es relativamente normal por ello la existencia y programación de las limpiezas de mantenimiento realizadas con una frecuencia de entre 3-6 meses, según lo indicado por cada proveedor en sus manuales de operación y mantenimiento. Sin embargo, existen algunos ensuciamientos que se detectan bruscamente y son respecto a ellos sobre los que se discutirá en ese punto.

Antes de empezar a detallar sobre el tema, es necesario indicar que un ensuciamiento brusco puede elevar las presiones de ingreso en los bastidores de ósmosis a valores muy por encima de lo habitual y al trabajar con grandes presiones del orden de 60 bar, un incremento sobre las presiones de trabajo que ya de por sí son altas, puede representar un peligro para las membranas y equipos sobre los cuales se aplica y también para el personal que se encuentre en

las inmediaciones ante una falla no controlada. Por ello, es primordial que los sistemas de protección se encuentren muy bien configurados y operativos, tales como la programación del sistema SCADA, relés de protección, distancias de seguridad del personal y todo lo que garantice la seguridad para trabajar con estas presiones.

Dicho esto, para plantas con un buen pretratamiento previo a la ósmosis inversa, como la descrita en este trabajo, es muy difícil que el ensuciamiento o saturación de membranas intempestivo provenga de la propia agua de mar o por limpiezas de mantenimiento como lo mencionado anteriormente ya que es necesario una cadena de fallas y errores continuos en todos los procesos previos que generen un ingreso directo del agua de mar hacia las unidades de ósmosis.

Usualmente la saturación generada en una membrana de ósmosis inversa será originada por una falla en el mismo proceso y, sobre todo, una falla por aporte de agua de salmuera hacia la línea de alimentación.

Como se explicó anteriormente, los recuperadores de energía son piezas mecánicas hechas de cerámica cuya función es girar utilizando como fuente de energía la presión residual generada por el agua de rechazo (salmuera) para lograr impulsar agua de alimentación aumentado su presión en aproximadamente 40-50 bar adicionales. Para este proceso, es fundamental que estas piezas giren constante y libremente de tal forma que no permita la mezcla entre el agua de rechazo y el agua de alimentación, el diseño admite una mezcla pequeña y despreciable de agua salmuera en agua de alimentación propia del mecanismo de funcionamiento, pero no con altas concentraciones que cambien considerablemente las características fisicoquímicas del agua de alimentación.

Los problemas de saturación surgirán cuando la rotación de estas piezas mecánicas se vea interrumpida parcial o totalmente, permitiendo que se ocasione una mezcla considerable entre el agua de alimentación y agua de salmuera. Ocurrido esto, el agua de alimentación mezclada con salmuera ingresará a las membranas de ósmosis como agua de alimentación, pero al contener esta una gran cantidad de sales producto de la salmuera obstruirá las membranas elevando las presiones considerablemente y haciendo que las protecciones detengan los equipos.

Para identificar si estos problemas son originados por una obstrucción parcial o total en el sistema de recuperadores de energía, puede descartarse de varias formas, pero esencialmente en base a lecturas de conductividad. Si los recuperadores de energía se encuentran atorados, la conductividad medida en cada punto de salida de cada recuperador de energía tendrá el valor igual a la conductividad de agua de alimentación. Esta medición debe hacerse en cada uno de los recuperadores de energía, pues se ha dado el caso que solo algunos estén obstruidos y el resto operativos, esto reduce el tiempo de mantenimiento correctivo seleccionando aquellos que requieran un mantenimiento urgente.

Otra de las formas para detectar un mal funcionamiento de los recuperadores de energía es a través del sonido que hacen al girar internamente. El sonido de un recuperador en perfecto estado de rotación será similar a un zumbido agudo y fuerte (como el de un abejón). Aquellos recuperadores que no tengan este sonido o que presenten un sonido con baja intensidad serán los que se encuentren obstruidos o parcialmente obstruidos. De igual forma, deberá corroborarse con las lecturas de conductividad.

A menudo, estas fallas se originan por una sobredosificación de antiincrustante (necesario e indispensable para la operación de una ósmosis inversa), esto produce que la cantidad residual

del reactivo forme con la salmuera una masa pegajosa y lechosa que obstruye la libre rotación de los recuperadores. Por ello, deben de mantenerse las dosis dentro del parámetro recomendado por el fabricante de antiincrustante.

Otra de las causas por las cuales se obstruyen los recuperadores de energía es por una falta de ajuste del tornillo central que tienen estas unidades. Al encontrarse ese tornillo más suelto de lo normal, produce que la rotación de los recuperadores no sea libre, sino que genera una fricción que no permite el giro con facilidad de estos equipos. Para evitar esto, es necesario programar una limpieza interior de mantenimiento periódica y así prevenir una falla de este tipo que sí podría condicionar el funcionamiento de la planta e incluso generar daños irreparables en los equipos y membranas.

5.12. Elevación del potencial Redox luego de limpiezas.

Como se había comentado en el fundamento teórico, el potencial redox dentro de una planta desalinizadora de ósmosis inversa es de crucial importancia. Ya que las membranas son susceptibles ante los agentes oxidantes y la presencia en exceso de estos puede ocasionar una degeneración en la estructura y funcionamiento de la membrana.

Esta elevación del potencial redox se da normalmente cuando se realizan las limpiezas por choque en las unidades de captación y pretratamiento. Esto es esperable ya que se dosifican altas concentraciones de cloro, alrededor de 20 ppm, lo cual conlleva a una elevación muy grande del potencial redox. Para ello, es necesario la dosificación de bisulfito de sodio en un punto que permita una reacción completa con el cloro antes de que este flujo de agua ingrese a la unidad de ósmosis inversa, permitiendo así la disminución del potencial redox y protegiendo a las membranas.

Lo descrito con anterioridad, al ser una dosificación durante la operación, es de esperarse y solo se deben de tener las medidas de contingencia listas y disponibles (bisulfito de sodio), sin embargo, durante la fase de operación se ha podido observar que las principales fallas por redox se dan luego de una limpieza química de mantenimiento a las membranas de ultrafiltración. Si bien es cierto, las limpiezas químicas se realizan aislando un bastidor de ultrafiltración temporalmente durante la producción de la planta, debido a que el proceso de limpieza de mantenimiento se realiza con dosificaciones de hipoclorito de sodio y a pesar de que las membranas son enjuagadas previo a su reingreso a la operación, se ha podido ver que muchas veces el enjuague realizado no es suficiente para desaparecer todas las trazas de cloro que puedan quedar como residuo de la limpieza dentro de las membranas. Esto ha originado que al ponerla en servicio nuevamente, eleve considerablemente el potencial redox y por este motivo se activen las protecciones de la planta, deteniéndola y paralizando la producción.

Ante estos eventos, se ha podido encontrar dos soluciones aplicables según las condiciones de producción en las que se encuentre la planta. Una de ellas es el mantener fuera de línea la unidad de ultrafiltración recién lavada y realizarle más enjuagues con agua ultrafiltrada hasta que se detecte bajo nivel de redox en su descarga. Esto podrá realizarse siempre que las condiciones de operación de la planta lo permitan, es decir, evaluando que las otras unidades de ultrafiltración tengan la capacidad de seguir compensando un bastidor fuera de servicio. Deberá considerarse la permeabilidad y presión transmembránica de las unidades en servicio y de ser viable podrá realizarse este proceso. Esta maniobra ahorra significativamente el consumo de bisulfito de sodio, pero como se ha indicado, debe de ser realizada evaluando las condiciones de operación de la planta. De lo contrario, el otro método posible será la dosificación de bisulfito de sodio.

5.13. Disminución del Permeado a 20°C.

La disminución de la permeabilidad, como se mencionó anteriormente, es el principal indicador de ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración. Ante esto, debe de verificarse que el ensuciamiento haya sido de manera normal y progresiva y no de una forma brusca e intempestiva ya que luego de las limpiezas de recuperación química, si el ensuciamiento a sido de manera brusca, entonces volverá a ensuciarse rápidamente debido a que la causa o fuente de origen de ensuciamiento no ha sido controlada. Estas causas pueden ser como se mencionó anteriormente, por una mala puesta en servicio luego de una limpieza de pozas, por un cambio en la calidad del agua, por alguna falla en las válvulas de los sistemas de pretratamiento, entre otras.

Ante esto, la solución para esta disminución es un mantenimiento correctivo mediante limpiezas de recuperación seleccionando uno de los insumos químicos recomendados por los fabricantes aplicado a las condiciones propias de la planta en estudio. Luego de las limpiezas de recuperación debe de asegurarse que los enjuagues se realicen de manera eficiente y con la cantidad suficiente de agua de tal forma de eliminar las trazas de reactivos utilizados durante las limpiezas y desestabilicen el proceso al entrar en funcionamiento los bastidores de ultrafiltración nuevamente.

5.14. Elevación del diferencial de Presión.

Al igual que en el sistema de ultrafiltración, una elevación en el diferencial de presión se deberá por causas de algún ensuciamiento en las membranas. De ocasionar un aumento brusco en el diferencial de presión, deberá de identificarse previamente la causa que lo originó para que posterior a las limpiezas químicas de membranas no vuelva a ocurrir de manera inmediata. Para esto, la solución para restablecer a su valor normal el diferencial de presión será mediante las limpiezas de recuperación química seleccionando uno de los insumos químicos recomendados por los fabricantes de acuerdo a las necesidades propias de la planta.

5.15. Ensuciamiento por calcitas.

Luego del tratamiento de ósmosis inversa, el flujo de agua ingresa al proceso de remineralización donde se hace pasar el agua osmotizada a través de un lecho de carbonato de calcio. Este proceso suele aumentar la turbidez en el agua proveniente de ósmosis inversa. Normalmente, la turbidez en la salida del proceso de ósmosis es del orden de 0,1 UNT, pero luego de pasar el proceso estabilizado de calcitas aumenta hasta 0,3 – 0,5 UNT. Sin embargo, suele darse el caso que con el tiempo en el interior del lecho se vayan formando precipitaciones que al acumularse se convierten en una suciedad del mismo lecho lo que hace aumentar la turbidez de salida en valores mayores a 1 UNT.

Para esto, es necesario que se programe y ejecute un lavado de calcita con agua y aire de tal forma que ayude a remover estas precipitaciones que generan turbidez arrastrándolas con el agua. De esta forma, al volver a poner en línea este lecho, se normalizarán los valores de turbidez propios de la remineralización.

Capítulo VI. Cuadro resumen de los problemas operativos vs soluciones recomendadas.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales problemas, causas y soluciones recomendadas según lo mencionado en el capítulo anterior.

Tabla 12

Principales problemas operativos

PRINCIPALES PROBLEMAS OPERATIVOS

Problema	Unidades Involucradas	Eventos detectables	Acciones Recomendadas
Sincronización de Presiones y Caudales	**Ultrafiltración**	Falla en las válvulas proporcionales	Inspección de componentes internos en actuador neumáticos y válvula, inspección del sistema de alimentación neumático, verificar presiones en los cuadros neumáticos, descartar fugas, mantenimiento y limpieza general de componentes internos, protección ante condiciones no favorables en la zona (humedad, salpicaduras de agua) .
		Falla en el envío y recepción de señales de apertura y cierre de válvulas.	Revisión de sistema de transmisión de señales, verificación de cableado y finales de carrera. Limpieza y mantenimiento de componentes electrónicos.
		Falla en el sistema de presurización de líneas de aire seco para válvulas neumáticas	Verificar funcionamiento de compresores, verificar presiones en tanque principal. Verificar la presencia de fugas de aire en las líneas neumáticas. Verificar la presencia de agua en las líneas.
		Desconfiguración en la programación del sistema SCADA.	Realizar pruebas manuales de apertura y cierre, verificación de la lógica de programación y secuencia de pasos. Corregir la configuración de ser necesario.

Sincronización de Presiones y Caudales	**Ósmosis Inversa**	Falla en válvula motorizada	Inspección de componentes internos de válvula, inspección del sistema de alimentación eléctrico al motor, descartar fugas, mantenimiento y limpieza general de componentes internos, protección ante condiciones no favorables en la zona.
		Falla en el envío y recepción de señales de apertura y cierre de válvulas.	Revisión de sistema de transmisión de señales, verificación de cableado y finales de carrera. Limpieza y mantenimiento de componentes electrónicos.
		Falla en el sistema de presurización de líneas de aire seco para válvulas neumáticas	Verificar funcionamiento de compresores, verificar presiones en tanque principal. Verificar la presencia de fugas de aire en las líneas neumáticas. Verificar la presencia de agua en las líneas.
		Desconfiguración en la programación del sistema SCADA.	Realizar pruebas manuales de apertura y cierre, verificación de la lógica de programación y secuencia de pasos. Corregir la configuración de ser necesario.
Despresurización del sistema con ciclos de lavado de membranas UF	**Ultrafiltración**	Falla en válvulas neumáticas.	Verificar configuración correcta de tiempos de apertura y cierre. Verificar hermeticidad de válvulas. Verificar funcionamiento correcto del sistema de aire de instrumentación. Verificar rangos de movimiento completos de obleas, realizar mantenimiento mecánico completo de ser necesario.
		Falla en el sistema de presurización de líneas de aire seco para válvulas neumáticas	Verificar funcionamiento de compresores, verificar presiones en tanque principal. Verificar la presencia de fugas de aire en las líneas neumáticas. Verificar la presencia de agua en las líneas.
		Desconfiguración en la programación del sistema SCADA.	Revisar la lógica de programación y secuencia de pasos. Corregir la configuración de ser necesario.

Falla en el encendido de algún equipo o accionamiento de alguna válvula	**Todas las áreas**	Falla en el sistema de señales de retroaviso	Verificar las señales de retroaviso, cableado y componentes. Realizar limpieza, ajuste y mantenimiento general de todos los componentes electrónicos.
		Desconfiguración de los parámetros de encendido	Verificar parámetros de encendido. Reconfigurar de ser necesario.
		Mal dimensionamiento o configuración de las llaves de protección.	Verificar corriente o voltaje nominal. Verificar valor de configuración de llaves de protección. Reconfigurar o cambiar de ser necesario.
Presencia de óxido en elementos metálicos	**Áreas con cercanía a ambiente marino**	Salpicaduras de agua	Proteger las partes o elementos metálicos expuestos al ambiente marino aislándolos con una barrera protectora (grasa, film, etc) o cambiando el material metálico por plástico de ser posible.
Ensuciamiento acelerado de membranas y filtros	**Ultrafiltración**	Mala hermeticidad de válvulas de proceso	Verificar los valores de turbidez y presión típicos en los flujos de alimentación, concentrado y permeado. Verificar alineamiento del elemento obturador y corregir de ser necesario. Verificar empaques de cierre de las válvulas. Lavado de membranas de Ultrafiltración
		Mala puesta en servicio de unidades recién limpiadas	Verificar programación de limpieza de unidades. Lavado de membranas de ultrafiltración.
	Ósmosis Inversa	Mala hermeticidad de válvulas de proceso	Verificar los valores de conductividad y presión típicos en los flujos de alimentación, concentrado y permeado. Verificar alineamiento del elemento obturador y corregir de ser necesario. Verificar empaques de cierre de las válvulas. Lavado de membranas de ósmosis inversa
		Mal funcionamiento de los recuperadores de energía	Verificar rotación de recuperadores de energía. Verificar valores de conductividad típicos en alimentación, permeado y salmuera. Realizar una limpieza general interior a los recuperadores de energía.

	Lechos de Calcita	Falta de limpieza de calcitas	Verificar valores de turbidez típicos aguas arriba y abajo de los lechos de calcita. Realizar lavados de mantenimiento hasta encontrar valores de turbidez aceptables.
Falla en membranas de ósmosis	**Ósmosis Inversa**	Elevación del potencial Redox	Verificar valores de potencial redox. Dosificar bisulfito de sodio en concentraciones suficientes para disminuir el potencial redox. Realizar monitoreos constantes de este parámetro.
Ensuciamiento progresivo de membranas	**Ultrafiltración**	Disminución del permeado a 20°C	Realizar limpiezas de recuperación con insumos recomendados por el fabricante.
	Ósmosis Inversa	Aumento del diferencial de presión	Realizar limpiezas de recuperación con insumos recomendados por el fabricante.

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Capítulo VII. Actividades de mantenimiento recomendadas de equipos y unidades de tratamiento principales

A continuación, se describen las actividades de mantenimiento recomendadas para una planta desalinizadora con las características de la descrita en este trabajo.

Tabla 13

Compuertas Motorizadas

Compuertas Motorizadas	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Quincenal
Limpieza externa general	Mensual
Verificación de hermeticidad (Apertura y cierre)	Semestral
Engrase de componentes mecánicos	Anual
Inspección de aislamiento y conexionado eléctrico de motor	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual

Tabla 14

Bombas Sumergibles

Bombas Sumergibles	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección y limpieza externa general de soportería y guías. Ajuste de pernos	Mensual
Limpieza y verificación de funcionamiento de medidores de presión	Mensual
Verificación de operatividad	Mensual
Inspección general de componentes eléctricos: megado de bobinas, medición de amperaje, verificación de tierras, verificación de conexionado y funcionamiento de botoneras.	Anual
Inspección y comprobación del estado de componentes mecánicos	Anual
Inspección de lubricante	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual

Tabla 15

Válvulas

Válvulas	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Mensual
Limpieza externa, ajuste de pernos, inspección de fugas	Mensual
Verificación de apertura y cierre, verificación de estanqueidad	Mensual
Inspección de conexiones eléctricas, verificación de funcionamiento, limpieza y ajuste de conexiones	Semestral
Inspección general del estado de componentes mecánicos	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual

Tabla 16

Compresores

Compresores/Soplantes	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Mensual
Limpieza externa, ajuste de pernos y verificación/limpieza de componentes mecánicos	Mensual

Inspección de lubricante/refrigerante	Mensual
Cambio de lubricante/refrigerante	Anual
Inspección de válvula de seguridad	Anual
Inspección general del estado de componentes mecánicos	Anual
Inspección general de componentes eléctricos: megado de bobinas, medición de amperaje, verificación de tierras, verificación de conexionado y funcionamiento de botoneras.	Anual
Inspección de pintura y remoción de óxido	Anual

Tabla 17

Skid o Armarios de Dosificación

Skid de Dosificación	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Mensual
Limpieza externa, ajuste de accesorios, verificación de fugas y componentes mecánicos.	Mensual
Verificación de operatividad, medición de temperatura	Mensual
Inspección general de componentes eléctricos: megado de bobinas, medición de amperaje, verificación de tierras, verificación de conexionado y funcionamiento de botoneras.	Semestral
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Anual
Inspección general del estado de componentes mecánicos	Anual

Tabla 18

Bombas Centrifugas

Bombas Centrífugas	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Quincenal
Limpieza externa general e inspección de soportería y guías	Mensual
Limpieza y verificación de funcionamiento de medidores de presión	Mensual
Verificación de operatividad, medición de temperatura	Mensual
Inspección de lubricante	Mensual
Inspección general de componentes eléctricos: megado de bobinas, medición de amperaje, verificación de tierras, verificación de conexionado y funcionamiento de botoneras.	Anual
Inspección y comprobación del estado de componentes mecánicos	Anual
Cambio de lubricante	Anual

Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Anual

Tabla 19

Bastidor de Membranas de Ultrafiltración

Membranas de Ultrafiltración	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual de ensuciamiento de membranas mediante visores	Mensual
Limpieza externa, ajuste de pernos y accesorios que conectan las membranas. Inspección de fugas	Mensual
Limpieza interna de válvulas mariposa (neumáticas, proporcionales y electroválvulas).	Semestral
Inspección general de los cuadros neumáticos. Ajuste e inspección de fugas.	Semestral
Inspección general del estado de conservación del bastidor.	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual
Limpieza Química de Membranas	Cuando requiera

Tabla 20

Bastidor de membranas de ósmosis inversa

Membranas de Ósmosis Inversa	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Mensual
Limpieza externa, ajuste de pernos y accesorios que conectan las membranas. Inspección de fugas	Mensual
Inspección de válvulas. Verificación de apertura y cierre y confirmación en SCADA	Mensual
Inspección general de los cuadros neumáticos. Ajuste e inspección de fugas.	Semestral
Limpieza interna de válvulas (neumáticas, proporcionales, plug).	Anual
Inspección general del estado de conservación del bastidor.	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual
Limpieza Química de Membranas	Cuando requiera

Tabla 21

Sistema de Recuperadores de Energía (ERI)

Sistema ERI	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Inspección visual	Mensual
Limpieza externa, ajuste de pernos y accesorios que conectan los dispositivos Inspección de fugas	Mensual
Limpieza interna, verificación del estado de conservación de componentes mecánicos	Anual
Inspección general del estado de conservación del bastidor.	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Bianual

Tabla 22

Lechos de Calcita

Lechos de Calcita	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Limpieza general de arreglo de tuberías, ajuste de pernos	Mensual
Inspección visual de filtraciones	Semestral
Verificación general de la estructura	Bianual
Lavado de calcitas	Cuando requiera

Tabla 23

Tableros Eléctricos

Tableros Eléctricos	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Limpieza interior de cubículo y componentes	Semestral
Limpieza de filtros de aire	Semestral
Ajuste de borneras y conexionado	Semestral
Inspección y verificación de aterramientos	Semestral
Medición de parámetros durante funcionamiento de equipo	Semestral

Tabla 24

Instrumentación

Instrumentación	
Actividad de Mantenimiento	**Frecuencia**
Limpieza exterior del instrumento	Semestral
Limpieza interior y ajuste de conexionado	Semestral
Verificación de lecturas del equipo	Anual
Mantenimiento de pintura y remoción de óxido	Anual

Capítulo VIII. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado en base a la experiencia profesional adquirida durante los primeros 4 años de operación de una planta desalinizadora de agua de mar. Como se ha podido ver, en una planta desalinizadora de agua de mar se cuenta con muchos equipos, instrumentos y accesorios interconectados, es decir, que dependen uno de otros para su correcto funcionamiento. Es por ello por lo que la mejor forma de operar este tipo de plantas será con un adecuado control de los parámetros operativos y un mantenimiento preventivo adecuado. Al respecto, se obtienen las siguientes conclusiones más relevantes.

- El control y monitoreo de los parámetros operativos garantizará la identificación a tiempo de los posibles problemas que puedan estar ocurriendo durante la operación de la planta.
- Queda claro que, aun cuando este tipo de plantas sean bastante automatizadas y cuenten con una gran cantidad de equipos electromecánicos, software de programación y demás, siempre será indispensable el entendimiento del proceso de tratamiento a detalle para poder identificar los problemas y tomar las acciones correctivas.
- Respecto a los mantenimientos preventivos, es indispensable realizar las actividades indicadas en los programas de mantenimiento preventivo de forma adecuada y en coordinación con todas las áreas involucradas (mecánica, eléctrica, instrumentación y procesos) para poder tener así una visión más amplia de los posibles problemas o mejoras a realizar.

Capítulo IX. Recomendaciones

Este trabajo ha sido basado en una planta desalinizadora con un sistema de conformado por unidades de DAF, Filtros Malla Autolimpiantes, Ultrafiltración, Filtros Cartucho, Ósmosis Inversas, Lechos de Calcita y Desinfección por Hipoclorito de Sodio. En ese sentido, se proponen las siguientes recomendaciones para la puesta en marcha y operación:

- Se sugiere considerar como mínimo los mantenimientos preventivos indicados en el capítulo VII.
- Es común encontrar durante los primeros años de operación algunas fallas provenientes de la fase de puesta en marcha. Por ello, se sugiere que al iniciar la fase de operación y mantenimiento se ejecute un análisis general de todos los procesos y su forma de funcionamiento involucrando a todas los profesionales de las áreas involucradas en la operación y mantenimiento de la planta (mecánica, eléctrica, instrumentación y procesos) para poder realizar las acciones correctivas necesarias para llevar el funcionamiento de la planta de forma eficiente.
- Como se indicó en el Capítulo V, en ocasiones es necesaria la intervención o modificación de la programación del sistema de automatización de la planta. Para estos casos, se sugiere tener un personal calificado para este tipo de trabajos y/o contar con la disponibilidad de un soporte técnico externo para cuando se requiera. Debe evaluarse la dedicación del personal calificado en función de la etapa en que se encuentre. Durante la fase de puesta en marcha se sugiere un personal permanente y en la fase de operación y mantenimiento podría bastar con un soporte técnico externo disponible a requerimiento del operador de planta.
- Se sugiere revisar y actualizar el plan de mantenimiento anualmente para poder ajustar las actividades y su frecuencia según vayan aumentado las horas de trabajo de los equipos y los posibles cambios en el proceso de tratamiento que sean necesarios en el caso de algún cambio en las condiciones de calidad del

agua de mar.

- Se sugiere que el personal técnico operativo cuente con capacitaciones y charlas de actualización que les permita aumentar su conocimiento en la detección de anomalías dentro del funcionamiento de la planta.

Capítulo X. Referencias

Barracchini Moreno, O. (2004). LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA. Teoría, técnica y procedimientos para obtener un recurso vital para sociedad contemporánea. Madrid, España.

Boluda Botella, N. (s.f.). DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN AGUAS IMPLICADAS EN PROCESOS DE DESALACIÓN. Alicante.

Cabero García, J. (2015). PROCESO DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR MEDIANTE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA DE MUY ALTA CONVERSION EN TRES ETAPAS CON RECIRCULACIÓN DE PERMEADO Y DOBLE SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA. Bilbao: Universidad del País Vasco.

Dévora Isiordia, G. E., González Enríquez, R., & Ponce Fernández, N. E. (2012). TÉCNICAS PARA DESALINIZAR AGUA DE MAR Y SU DESARROLLO EN MÉXICO.

Franco Ruiz, Á. (2019). CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN. ESTUDIO COMPARATIVO MEDIANTE POROSIMETRIA LLDP Y ANALISIS DE IMAGENES SEM. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.

Grupo Dimasa. (2018). Dimasa Grupo. Obtenido de Dimasa Grupo: http://www.dimasagrupo.com/portfolio_page/filtros-cartucho-planta-desaladora-escombreras-murcia

Hidalgo Montesinos, A. M. (2006). Desalación de agua osmosis inversa implicaciones medioambientales y lucha contra la sequia.

Hydranautics. (2014). Boletín de servicio técnico TSB 105.11.

Hydranautics. (2016). Boletín de servicio técnico TSB113.04.

Hydranautics. (2017). Boletin de Servicio Técnico TSB 339.04.

Hydranautics. (2017). Boletín de Servicio Técnico TSB107.25.

Hydranautics. (2017). Boletín de Servicio Técnico TSB107.25.

Hydranautics. (2018). Boletín de Servicio Técnico TSB340.04.

ISA PROYECTOS Y MONTAJES. (2018). ISA PROYECTOS. Obtenido de ISA PROYECTOS: https://www.isaproyectos.com/experiencia/montaje-mecanico/montaje-de-tuberias-y-sistemas-de-filtrado-lechos-de-calcita-provisur/

López Geta, J., & Mejías Moreno, M. (2000). LAS AGUAS SALOBRES. UNA ALTERNATIVA AL ABASTECIMIENTO EN REGIONES SEMIARIDAS.

Maldonado López, L. E. (2017). Obtención y caracterización de membranas poliméricas para desalinización de agua. San Luis de Potosí.

Ministerio de Sanidad y Política Social. (2009). Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Madrid.

Orozco Jaramillo, A. (2005). Bioingeniería de Aguas Residuales. Bogotá: ACODAL.

PENAS RIOS, C. G. (2018). CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE MAR DE LA ZONA LITORAL DE CHORRILLOS Y PUERTO CHICO. BARRANCA.

Pineda Arellano, C. A. (2018). DESALINIZACIÓN DE AGUA PARA APLICACIONES DE POTABILIZACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE TECNOLOGIA SOLAR SUSTENTABLE. México.

Ramírez Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. Canal Educa.

Riera, M., & Graterol, N. (2015). Diseño de una unidad de fltoación con aire disuelto para la remoción de contaminantes de las aguas residuales generadas en una empresa manufacturera. Barquisimeto.

Romero Rojas, J. A. (2009). CALIDAD DEL AGUA. Bogotá: EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA.

Sánchez Alcaide, A. (2017). ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PRINCIPALES PROCESOS DE DESALINIZACIÓN Y DISEÑO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA CON UNA CAPACIDAD DE 10.000 M3/DIA. Madrid.

Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de Membrana:

Ultrafiltración. Entre Ciencia e Ingeniería, 36.

STF-Filtros. (s.f.). FMA-10000 Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento. STF.

Tejedor, C. (2008). Introducción a la Desalación por ósmosis inversa. Conceptos Básicos. Escuela de Organización Industrial.

Valero, A., Uche, J., & Serra, L. (2001). LA DESALACIÓN COMO ALTERNATIVA AL PHN. Zaragoza: Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos.

Villegas mendoza, I., Piña Soberanis, M., Alvilla Rivera, A., Silva Luna, C., & Linares Ocampo, J. (2020). Remineralización de agua osmotizada mediante un contactor de calcita de flujo continuo ascendente. Tecnología y Ciencias del Agua, 32.

Zarza Moya, E. (1991). DESALINIZACIÓN DE AGUA DEL MAR MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES. Plataforma Solar Almería - CIEMAT.