

**ANÁLISIS ECONÓMICO DE PROYECTO DE
REDUCCIÓN DE USO DE AGUA EN SISTEMAS
DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL**

**ECONOMIC ANALYSIS OF THE PROJECT TO
REDUCE THE USE OF WATER IN
INDUSTRIAL REFRIGERATION SYSTEMS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por: Claudio Flores Figueroa

Dirigido por: Alberto del Villar (UAH)

Alcalá de Henares, 18 de enero de 2023

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, al Creador del elemento de estudio, el agua, que pese a su simpleza, tiene características especiales que la hacen extraordinaria, lo cual no deja duda que es el resultado de una mente inmensamente superior.

A mi familia, por el constante apoyo.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 1 |
| Introducción..... | 2 |
| 1. Objetivos..... | 3 |
| 2. Metodología..... | 3 |
| 3. Resultados..... | 7 |
| 3.1. Caso de Análisis. Circuito de Refrigeración de Centro de procesamiento de Datos..... | 7 |
| 3.2. Caso De Análisis. Circuito De Refrigeración Planta Productora de Energía..... | 17 |
| 4. Discusión..... | 31 |
| 5. Conclusiones..... | 33 |
| 6. Bibliografía..... | 34 |
| 7. Anexos | |
| Anexo 7.1. El agua como medio de refrigeración. | 35 |
| Anexo 7.2. Tipos de sistemas de refrigeración | 36 |
| Anexo 7.3. Química del circuito de agua de refrigeración | 41 |
| Anexo 7.4. Normativa..... | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Disponibilidad hídrica de agua superficial (m ³ /s) | 2 |
| Figura 2.1. Algoritmo de análisis para dimensionar el tamaño y condiciones de operación de alternativa de solución | 5 |
| Figura 3.1. Diagrama simplificado de la propuesta de solución para reducción de consumo | 10 |
| Figura 3.2. Diagrama simplificado de la propuesta de solución para reducción de consumo en planta productora de energía..... | 19 |
| Figura 3.3. Área de concesión de Sacyr Aguas Santiago..... | 29 |
| Figura 7.1. Relación entalpía vs temperatura del agua..... | 36 |
| Figura 7.2. Sistema de enfriamiento de un paso..... | 37 |
| Figura 7.3. Sistema cerrado de enfriamiento..... | 38 |
| Figura 7.4. Sistema de enfriamiento por recirculación abierta..... | 38 |
| Figura 7.5. Evolución de caudales de reposición y purga con el aumento de ciclos de concentración..... | 40 |
| Figura 7.6. Solubilidad con respecto a cambios en la temperatura en sales de calcio.... | 42 |
| Figura 7.7. Disponibilidad hídrica de agua superficial (l/s)..... | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Condiciones de operación actual del circuito de refrigeración..... | 8 |
| Tabla 3.2. Caracterización agua de reposición al circuito de agua de refrigeración..... | 8 |
| Tabla 3.3. Caracterización agua de purga que se elimina al sistema de alcantarillado..... | 9 |
| Tabla 3.4. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa..... | 11 |
| Tabla 3.5. Caracterización agua efluente hacia la red de alcantarillado..... | 11 |
| Tabla 3.6. Especificación técnica Básica Planta de Osmosis..... | 12 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3.7. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico..... | 13 |
| Tabla 3.8. Costos de instalación y operación de planta de osmosis..... | 13 |
| Tabla 3.9. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis..... | 14 |
| Tabla 3.10. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico..... | 14 |
| Tabla 3.11. Incidencia en el CAE en una modificación del 10% de variables que influyen en el proyecto..... | 16 |
| Tabla 3.12. Condiciones de operación actual del circuito de refrigeración..... | 17 |
| Tabla 3.13. Caracterización agua de reposición al circuito de agua de refrigeración..... | 18 |
| Tabla 3.14. Caracterización agua de purga del circuito de agua de refrigeración..... | 18 |
| Tabla 3.15. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa..... | 20 |
| Tabla 3.16. Calidades de agua como resultado del uso de planta de osmosis inversa...21 | |
| Tabla 3.17. Descripción básica de la unidad de Osmosis Inversa..... | 21 |
| Tabla 3.18. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico..... | 22 |
| Tabla 3.19. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico..... | 22 |
| Tabla 3.19. Costos de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta de producción de energía..... | 23 |
| Tabla 3.20. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta producción de energía..... | 23 |
| Tabla 3.21. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa para uso directo en circuito de agua de refrigeración..... | 24 |
| Tabla 3.22. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta producción de energía restando ahorro de agua de pozo y venta de agua de efluente..... | 26 |
| Tabla 3.23. Sostenibilidad financiera..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3.24. Productividad en USD proveniente de reducción de uso de agua, para el caso analizado..... | 28 |
| Tabla 3.25: Incidencia en el balance del proyecto con una modificación del 10% de variables..... | 30 |
| Tabla 7.1. Decreto Supremo N°90, Tabla N°1..... | 48 |
| Tabla 7.2. Límites máximos permitidos para la descarga de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas...51 | 51 |

TABLA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------|---|
| ACB: | Análisis Costo-Beneficio |
| DGA: | Dirección General de Aguas |
| MOP: | Ministerio Obras Publicas |
| TFM: | Trabajo Fin de Master |
| ISPA: | Instrumento Estructural de Preadhesión |
| FEDER: | El Fondo Europeo de Desarrollo Regional |
| U.S. EPA: | Agencia de protección ambiental de Estados Unidos |
| TIC: | Tecnologías de Información y Comunicación |
| Adim: | Adimensional |
| D.S.: | Decreto Supremo |
| CAE: | Coste anual Equivalente |
| SISS: | Superintendencia de Servicios Sanitarios |
| CNE: | Comisión Nacional de Energía |
| RO: | Osmosis Inversa |
| RCA: | Resolución de Calificación Ambiental |
| USD: | dólares norteamericanos |
| VAN: | Valor Actual Neto |
| TIR: | Tasa interna de retorno |
| CLP: | pesos chilenos |
| INE: | Instituto Nacional de Estadísticas |
| MU: | <i>Make Up</i> (reposición) |
| BD: | <i>Blowdown</i> (purga) |
| SEA: | Servicio de Evaluación Ambiental |
| SEIA: | Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental |
| DAA: | Derecho de aprovechamiento de Agua |
| EDI: | Electro-Deionización |
| EDR: | Electrodialisis Reversible |

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis costo-beneficio, basado en metodología aplicable a la Unión Europea, de alternativas de reducción de consumo de agua en procesos de enfriamiento a nivel industrial. Se estudian dos casos específicos de la zona central de Chile. Se determinan los límites de físicos y químicos para el uso eficiente del recurso hídrico, intentando determinar cuáles son los factores preponderantes en la búsqueda de la eficiencia en el uso. Por otro lado, se muestra los aspectos legislativos a tener en cuenta al momento de realizar un proyecto industrial que genere efluentes líquidos, haciendo hincapié en cómo se disponen los efluentes de los sistemas de refrigeración, tanto en cuerpos de agua continental, como así en cuerpos de agua marítimos.

Se definen parámetros de control químico como base para analizar dos casos de optimización. Estos casos están basados en dos tipos de industrias, con diferentes fuentes de agua para uso industrial. Uno se provee de agua potable con el costo adicional que esto conlleva, el otro con agua de pozo que obtiene mediante un derecho de aprovechamiento de agua, que le permite utilizar un caudal determinado, que en este caso es mucho mayor a lo necesitado.

Finalmente, se diseñan sistemas de filtración por membranas, para hacer que estos sistemas de refrigeración sean más eficientes en el uso del recurso, se obtienen resultados de reducción en el consumo de agua, y se valoriza estos ahorros, se analiza la viabilidad financiera de estos proyectos, mediante análisis comparativo de coste anual equivalente de la inversión. Los cuales se comparan con la inversión y se observa si es viable financieramente el proyecto, finalmente se analiza el impacto económico en la región y se lleva adelante un análisis de sensibilidad. En el último caso estudiado, se propone una alternativa técnica que permite llevar adelante el proyecto más allá de la viabilidad financiera, considerando el impacto económico en la región el uso alternativo del agua que se ahorra en estos procesos de refrigeración.

INTRODUCCIÓN

La cantidad de agua para uso en refrigeración en la industria es difícil de estimar, dado que su consumo una parte del uso total en esta área. La dirección general del agua DGA, ha estimado que el consumo de agua para uso industrial el año 2016 en la región metropolitana de Chile es de 10,42 m³/s, Figura N°1 (DGA, Atlas del Agua, Chile 2016). En Japón en 1996 se utilizaron cerca de 149 Hm³ en procesos industriales, de los cuales se estima que el 70% se utilizó en procesos de refrigeración (*Kurita Handbook of Water Treatment*, 1999). Lo anterior nos da una idea de la cantidad de agua necesaria para realizar estos procesos.

| Macrozona | Región | Agropecuario | Agua Potable | Industrial | Minero | Total [m ³ /s] |
|-----------|--------|--------------|--------------|------------|--------|---------------------------|
| Norte | XV | 3,71 | 0,96 | 0,25 | 0,00 | 4,92 |
| | I | 5,21 | 0,69 | 1,43 | 1,54 | 8,87 |
| | II | 3,31 | 1,68 | 1,29 | 6,26 | 12,54 |
| | III | 12,03 | 0,87 | 0,52 | 1,90 | 15,32 |
| | IV | 27,19 | 1,89 | 0,25 | 0,71 | 30,04 |
| Centro | V | 42,44 | 5,82 | 4,81 | 1,26 | 54,33 |
| | RM | 82,36 | 27,41 | 10,42 | 0,90 | 121,09 |
| | VI | 97,96 | 2,41 | 1,23 | 1,88 | 103,48 |
| | VII | 166,49 | 2,53 | 3,77 | 0,00 | 172,79 |
| Sur | VIII | 69,44 | 5,16 | 9,54 | 1,21 | 85,35 |
| | IX | 11,51 | 2,34 | 0,26 | 0,00 | 14,11 |
| | XIV | 2,21 | 1,02 | 1,63 | 0,00 | 4,86 |
| | X | 1,10 | 1,39 | 2,46 | 1,50 | 6,45 |
| Austral | XI | 0,64 | 0,29 | 0,08 | 2,60 | 3,61 |
| | XII | 1,12 | 0,38 | 5,91 | 0,23 | 7,64 |
| | | 526,72 | 54,84 | 43,85 | 19,99 | 645,40 |

Figura 1: Disponibilidad hídrica de agua superficial (m³/s), tomada de Atlas de agua Chile 2016

En definitiva, la cantidad de agua que se puede llegar a utilizar en procesos de refrigeración, es una cantidad nada despreciable y los esfuerzos para hacer del uso de este recurso siempre serán necesarios, sobre todo en el escenario actual de escasez hídrica. Desde marzo de 2022 el ministerio de obras públicas ha declarado algunas comunas de la región metropolitana como zonas de escasez hídrica, Decreto MOP N°64, Decreto MOP N°65, Decreto MOP N°66. Otorgando a la Dirección General de Aguas, la administración de los recursos hídricos superficiales y subterráneos para reducir al mínimo el impacto de la sequía.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Realizar un análisis económico de alternativas tecnológicas basadas en osmosis inversa, que permitan reducir el consumo de agua en un ámbito de la refrigeración industrial.

1.2. Objetivos específicos

- 1.2.1. Entender el uso del agua como medio de enfriamiento industrial
- 1.2.2. Identificar las distintas fuentes de agua disponible para uso industrial.
- 1.2.3. Analizar dos casos de alternativas de reducción de uso de agua, mediante la utilización de tecnología de osmosis inversa.
- 1.2.4. Realizar un análisis costo beneficio (ACB) a los proyectos de reducción de consumo de agua para los casos analizados.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo de fin de master (TFM) se utilizará la metodología de coste-beneficio de los proyectos de inversión, para el análisis económico de las alternativas de reducción de uso de agua procesos de enfriamiento industriales, para la aplicación de esta metodología, se utilizara, la “Guía del Análisis Coste-beneficios de los proyectos de inversión” elaborada para la Unidad responsable de la evaluación DG Política Regional Comisión Europea (Fondos Estructurales – FEDER, Fondos de cohesión y ISPA)

La metodología nombrada anteriormente plantea un desarrollo del análisis que podemos adaptar y resumir en los siguientes puntos

- Definición de objetivos
- Identificación del proyecto
- Análisis de viabilidad y de las opciones
- Análisis financiero

- Inversiones
 - Activos fijos (Equipos + construcción + mantenimiento)
 - Costes de inversión (lo anterior + capital circulante neto)
- Ingresos
 - Ventas – Costes de Fabricación
 - Ajuste en función de la inflación
- Sostenibilidad financiera
- Selección de tasa de descuento adecuada
- Análisis económico
 - corrección de las externalidades (uso del agua en otras actividades, por ejemplo)
- Análisis de sensibilidad y riesgo
 - Análisis de escenarios, entre otros

Para alimentar este análisis de coste-beneficios, debemos desarrollar un análisis técnico que nos permita inicialmente comprender la naturaleza del proceso a analizar, se introducirán algunos conceptos técnicos básicos referentes al uso del agua como medio de enfriamiento de procesos industriales, ver Anexo 7.1 El agua como medio de refrigeración. Sumado a lo anterior, se citarán algunas nociones de tratamiento de agua, relacionadas con la química de los procesos de precipitación de especies disueltas en el agua, ya que este último aspecto, tiene directa relación a la cantidad de agua que puede utilizarse para los procesos de refrigeración, Ver Anexo 7.3 Química del circuito de agua de refrigeración.

Por otro lado, se presentarán algunas alternativas de reducción de uso del agua mediante la utilización de herramientas tecnológicas de desalación a nivel industrial. El análisis se llevará a cabo mediante sistemas informáticos de desarrollo de soluciones de filtración por membranas, que son de uso industrial y de acceso público, lo que permite determinar el tamaño de estos sistemas y las condiciones de operación necesarias para su funcionamiento. Estas alternativas serán analizadas en dos casos particulares, que tienen la peculiaridad de proceder de fuentes de aguas distintas, lo que confiere al análisis una oportunidad de análisis económico interesante.

La herramienta que se utilizará en el análisis técnico de la solución de osmosis inversa es el programa WINFLOWS versión 4.04, con el cual se puede obtener el tamaño de la unidad de osmosis, como así también condiciones de operación, simulación de calidades químicas de las aguas de producto y rechazo, al igual que recomendaciones de tratamiento y membranas. Para simular las condiciones de operación del circuito de agua de refrigeración, se utiliza un programa basado en planillas Excel, para determinar la evolución de las concentraciones de especies disueltas, tendencias de incrustaciones, como así también las condiciones de fluidodinámicas de operación.

Para determinar finalmente cual es el tamaño de la planta de osmosis inversa, como también de las condiciones de operación del circuito que cumplan con las condiciones definidas por la autoridad medioambiental, utilizaremos el siguiente algoritmo que permitirá obtener una solución satisfactoria. Este algoritmo se muestra en la siguiente figura 2.1:

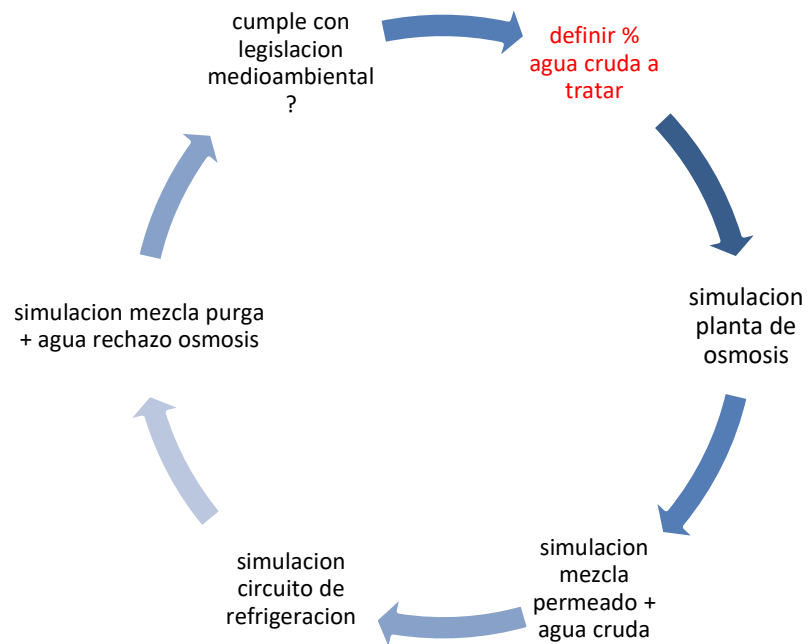


Figura 2.1: Algoritmo de análisis para dimensionar el tamaño y condiciones de operación de alternativa de solución

Como es un ciclo de iteraciones, se inicia con la definición del porcentaje de agua cruda que pasará por el sistema de osmosis inversa, pasando por el resto de simulaciones, hasta llegar a la pregunta final, si los resultados cumplen con los

requerimientos medioambientales, si es así, se tiene una solución, si no, se inicia nuevamente desde el punto de la definición (en rojo) en la figura 2.1.

Por último, tomaremos estas alternativas y analizaremos la fiabilidad económica y el impacto que puede generar la aplicabilidad de estos proyectos de reducción de uso de agua en el medio, pudiendo tener un impacto socioeconómico interesante, según la magnitud de la reducción.

3. RESULTADOS

3.1.Caso de Análisis. Circuito de Refrigeración de Centro de procesamiento de Datos

Un centro de procesamiento de datos, es una instalación que según la Agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos (U.S EPA) “Principalmente equipos electrónicos utilizados para procesamiento de datos (servidores), almacenamiento de datos (equipos de almacenamiento) y comunicaciones (equipos de red). Colectivamente, este equipo procesa, almacena y transmite información digital” Complementariamente “Equipos de respaldo y conversión de energía especializados para mantener energía confiable y de alta calidad, así como equipos de control ambiental para mantener la temperatura y la humedad adecuadas para los equipos de TIC” (*Hwaiyu Geng, Data Center Handbook, 2015*)

En este sentido, estas instalaciones son grandes consumidores de energía, se estima que el consumo global al 2010 de estos centros de datos alcanzo entre el 1,1% y el 1,5% de todo el uso de electricidad a nivel mundial (*Eric Masanet, et.al, Recalibrating global data center energy-use estimates, 2020*) se estima que el 45% de la energía que consumo un centro de datos es utilizada por los equipos de tecnología de información y comunicación y el 55% de la energía es consumida por los sistemas de distribución de energía, enfriadores, sistemas de acondicionamiento de aire etc. (*Hwaiyu Geng, Data Center Handbook, 2015*)

Se tomará el caso de un centro de datos de la región central de Chile, donde se utiliza sistemas de refrigeración de los equipos (servidores) del tipo evaporativos de recirculación abierta.

3.1.1. Definición de objetivos

Alineado al objetivo de este trabajo, el proyecto tiene como objetivo la reducción de uso de agua, en este caso potable, para los sistemas de refrigeración de la planta, haciendo uso de tecnología de desalación.

3.1.2. Identificación del proyecto y análisis de viabilidad

Inicialmente, se definen las condiciones de operación del sistema de refrigeración, en cuanto al caudal de consumo de agua, caudal de efluente, etc. A continuación, se muestra la tabla 3.1 con estos parámetros, para más detalle del funcionamiento de un circuito de agua de refrigeración, ver Anexo 7.2 Tipos de sistemas de refrigeración.

Tabla 3.1. Condiciones de operación actual del circuito de refrigeración. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Tipo de Sistema de refrigeración | | Recirculación abierta |
| Consumo de agua de reposición | m ³ /h | 200 |
| Purga | m ³ /h | 100 |
| Evaporación | m ³ /h | 100 |

Considerando que el consumo de agua de reposición corresponde a agua potable suministrada por una empresa sanitaria de la región central de Chile, la caracterización química, relacionada al proceso de refrigeración es la siguiente

Tabla 3.2. Caracterización agua de reposición al circuito de agua de refrigeración. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | unidades | Valor |
|---------------------------------|--------------------|--------------|
| pH | Adim. | 7,93 |
| Conductividad | <i>micromho/cm</i> | 1.554 |
| TDS (sólidos totales disueltos) | mg/l | 1.040 |
| Dureza Total | mg/l | 620 |
| Dureza Cálrica | mg/l | 500 |
| Alcalinidad | mg/l | 150 |
| Sílice | mg/l | 30 |
| Cloruros | mg/l | 250 |
| Sulfatos | mg/l | 310 |

Además, debemos considerar el tratamiento químico necesario para alcanzar el nivel de concentración con la limitante que el efluente (purga del circuito) cumpla con el Decreto N°609, Tabla N°4. (ver Anexo 7.4 Normativa) Esto es importante, ya

que, sin un tratamiento adecuado, no se podría optimizar el consumo del circuito y la concentración debería ser mucho menor, aumentando la purga del circuito y con ello el consumo de agua. ver tabla 3.3.

Tabla 3.3. Caracterización agua de purga que se elimina al sistema de alcantarillado. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|---------------|--------------|
| pH | Adim. | 8,7 |
| Conductividad | micromho/cm | 3.100 |
| TDS (solidos totales disueltos) | mg/l | 2.080 |
| Dureza Total | mg/l | 1.240 |
| Dureza Cálcica | mg/l | 1.000 |
| Alcalinidad | mg/l | 300 |
| Sílice | mg/l | 60 |
| Cloruros | mg/l | 500 |
| Sulfatos | mg/l | 620 |

La propuesta de solución para reducir el consumo de agua de este sistema, consiste en la idea de utilizar tecnología de desalación, tal como se mencionó en el apartado de metodología. La propuesta sugiere instalar una unidad de osmosis inversa para tratar parte del agua de reposición, esto quiere decir, que parte del agua que se usará como agua de reposición pasará por la planta de osmosis, luego el permeado se mezclará con la otra parte de agua potable, para producir el agua de reposición al circuito de refrigeración. Con esto se reduce la cantidad de sales disueltas en el agua de reposición y se puede concentrar aún más el agua en el circuito, llevando a una reducción del consumo de agua de todo el sistema, para más detalle ver anexo 7.3 Química del circuito de agua de refrigeración. Finalmente, el concentrado de la planta de osmosis, se mezcla con la purga del circuito de agua de refrigeración, teniendo como límite, la normativa que aplica (D.S N°609, Tabla N°4)

Un diagrama simplificado del sistema se muestra a continuación.

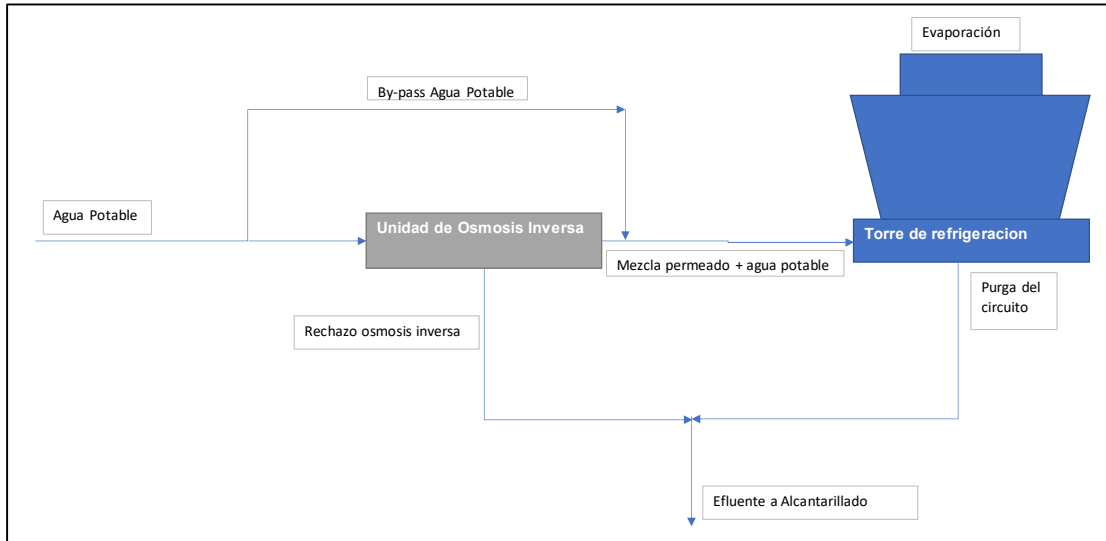


Figura 3.1. Diagrama simplificado de la propuesta de solución para reducción de consumo. Fuente: elaboración propia

Como quedo expuesto en el apartado de la metodología, se requiere iterar definiendo inicialmente el porcentaje de agua que será tratado en la planta de osmosis, luego diseñar la unidad de osmosis inversa para ese caudal, a continuación, simular la mezcla de agua que conformará el agua de reposición del circuito de agua de refrigeración, para luego simular las condiciones de operación del circuito. Una vez obtenida la caracterización de la calidad de agua de purga, se simula la mezcla de esta con el rechazo de la planta de osmosis. Para finalmente comparar si la calidad de este efluente, que va al alcantarillado cumple con la normativa (D.S. N°609, Tabla N°4) Si no se alcanza la calidad requerida, se debe nuevamente iniciar el proceso, hasta obtener el resultado optimo.

Luego de realizar este proceso, se obtuvo los siguientes resultados de caudales de agua de ingreso, agua de reposición, agua de purga y agua de efluente, estos se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---|------------------------|--------------|
| Consumo de agua potable | m³/h | 164 |
| Agua ingreso a planta de osmosis | m ³ /h | 136,5 |
| Derivación agua potable | m ³ /h | 27 |
| Agua Permeado planta de osmosis inversa | m ³ /h | 95,5 |
| Agua Rechazo Planta de Osmosis inversa | m ³ /h | 41 |
| Porcentaje recuperación planta de osmosis | % | 70 |
| Reposición Torre de enfriamiento | m ³ /h | 122,7 |
| Purga Torre de enfriamiento | m ³ /h | 22,7 |
| Efluente hacia red alcantarillado | m³/h | 63,7 |
| Evaporación | m ³ /h | 100 |

Hay que considerar que la evaporación es la misma en la operación normal, con respecto a la operación usando una planta de osmosis inversa, ya que la carga térmica que debe ser disipada es la misma. En términos de concentración, los ciclos de concentración de la operación normal, sin el proyecto de mejora, tienen un valor de 2. En el caso de la operación de la planta de osmosis inversa, los ciclos de concentración aumentan a 5,4 (este valor se calcula como el cociente entre el flujo de reposición dividido por el flujo de agua de purga) lo que implica una reducción desde 100 m³/h de purga en la operación normal a unos 22,7 m³/h en la operación optimizada. Siendo el ahorro anual de agua potable de 315.360 m³/año. Finalmente, el efluente tiene la calidad que cumple la normativa, ver tabla 3.5

Tabla 3.5. Caracterización agua efluente hacia la red de alcantarillado. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|---------------|--------------|
| TDS (sólidos totales disueltos) | mg/l | 3.119 |
| Sílice | mg/l | 80 |
| Cloruros | mg/l | 658 |
| Sulfatos | mg/l | 812 |

El diseño de la planta de Osmosis Inversa arrojó las siguientes especificaciones básicas, ver tabla 3.6.

Tabla 3.6. Especificación técnica Básica Planta de Osmosis. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Consumo de energía | KW | 66,8 |
| Consumo anual de energía | KWh | 585.327 |
| Cantidad de membranas | Unidades | 180 |

3.1.3. Análisis Financiero

Para el desarrollo de un análisis financiero de este proyecto, debemos considerar que, dado que la operación del circuito de refrigeración es un costo en si en la operación de toda la unidad, un ahorro en el costo de operación, implicará un beneficio a la organización. El análisis que se lleva a cabo, está relacionado a si la reducción neta de costo en la operación del circuito de agua de refrigeración, debida a la puesta en marcha del proyecto en el transcurso del tiempo estimado, solventa la inversión inicial del proyecto y los costos derivados de la operación. En definitiva, nuestro análisis financiero irá enfocado en determinar los costes actuales, proyectarlos a la vida útil del proyecto, 10 años, transformándolos en un Coste anual equivalente, posteriormente hacer el mismo análisis para los costes del proyecto y evaluar el coste anual equivalente de ahorro.

Consideramos el precio del agua potable, como del precio del tratamiento del agua que se vierte al alcantarillado, obtenido de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) donde el precio del agua potable es 0,54 USD/m³ y el precio del agua que se descarga a la red de alcantarillado es de 0,70 USD/m³ podemos valorizar el costo anual de operar este sistema de refrigeración, ver Tabla 3.7

Tabla 3.7. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor | |
|-------------------------------------|----------------|--------------|------------------|
| Costo anual de agua de reposición | USD/año | \$ | 946.080 |
| Costo anual descarga alcantarillado | USD/año | \$ | 613.200 |
| Costo anual tratamiento químico | USD/año | \$ | 407.341 |
| Costo total anual | USD/año | \$ | 1.966.621 |

Debido a que los costos de fabricación, instalación y operación dependen de cada oferente, del tamaño de la planta y de algunas consideraciones particulares de negocio, se ha tomado una estimación de una empresa de fabricación de plantas de osmosis inversa en Chile, quienes han otorgado una estimación a nivel *Budget*. La estructura de costo de instalación y operación es la siguiente. Se considera un precio de la energía de 0,1 (USD/m³) acorde con la regulación tarifaria que implementa la Comisión Nacional de Energía (CNE), ver tabla 3.8.

Tabla 3.8. Costos de instalación y operación de planta de osmosis. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor | |
|------------------------------------|---------------|--------------|----------------|
| Costo equipamiento | USD | \$ | 570.000 |
| Costo membranas | USD | \$ | 90.000 |
| Costo instalación (estimado) | USD | \$ | 200.000 |
| Costo anual de operación | USD/año | \$ | 59.000 |
| Costo Total de la Inversión | USD | \$ | 860.000 |

Se considera una vida útil de 10 años de la planta de osmosis, además las membranas se cambian cada 3 años, por lo tanto, se puede anualizar el costo mediante el método del Coste anual equivalente (CAE), para eso, se utilizará una tasa de descuento de un 8%, utilizada en un estudio similar (*Dietmar Brakemeier, Fitchner, Evaluación Económica entre Osmosis Inversa (RO) y Desalinización Solar Térmica, 2015*) que utilizaremos de referencia. Los costes anualizados se muestran a continuación en la tabla 3.9

Tabla 3.9. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------|----------------|-------------------|
| CAE equipamiento | USD/año | \$ 84.947 |
| CAE Instalación | USD/año | \$ 53.651 |
| CAE membranas | USD/año | \$ 29.806 |
| CAE de operación | USD/año | \$ 87.927 |
| Costo Total anual | USD/año | \$ 256.331 |

Por otro lado, se realiza el mismo tratamiento del costo anual de operación, de todo el proyecto, considerando el precio del agua potable, el precio del agua que se descarga a la red de alcantarillado y el costo por tratamiento químico, quedando de la siguiente manera que muestra la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|
| Costo anual de agua potable | USD/año | \$ 775.786 |
| Costo anual descarga alcantarillado | USD/año | \$ 390.608 |
| Costo anual tratamiento químico | USD/año | \$ 92.638 |
| Costo total anual | USD/año | \$ 1.259.032 |

Si se suma el costo anual del recurso más el costo anual de instalación y operación de la planta de osmosis, se tiene **\$ 1.512.363 (USD/año)**.

Si se comparan los costes anuales de ambos casos, el primero en operación actualmente (ver tabla 3.7), contra el proyecto de instalación y operación de planta de osmosis inversa (tabla 3.10), tenemos un ahorro neto anual de **USD 454.258 por año**. En términos simples, el retorno de la inversión se lograría en 2 años.

3.1.4. Análisis Económico

Dado que la disminución de uso de agua potable, presenta una contribución al bienestar económico de la zona donde está emplazada esta industria, se puede considerar esto como una externalidad positiva y cuantificarla como un beneficio económico en el análisis. Se propone, dado que el agua potable, no se usará en el circuito de enfriamiento, podría ser usado para uso doméstico de un cliente residencial. La valorización de este concepto, sería el valor de venta del agua, más el precio de tratamiento del efluente, lo que termina siendo **391.046 USD/año**.

En relación al consumo de agua por los sistemas de aguas de refrigeración, se puede hacer una equivalencia entre la reducción en el consumo diario de estas industrias, más específicamente de los casos analizados, comparado con la dotación de agua potable promedio en la región metropolitana. Según la Superintendencia de servicios Sanitarios, el 2017 la dotación en litros por habitante por día en la ciudad de Santiago, agua suministrada por Aguas Andinas S.A. que provee el agua para 5.383.030 habitantes, fue de 171 l/día/habitante.

En el caso del centro de datos, la reducción de consumo de agua, mediante la implementación del proyecto de tratamiento de parte del agua de reposición, en una planta de osmosis inversa, generó una reducción de 36 m³/h que equivale a 864 m³/día. Entonces la cantidad de habitantes que podrían beneficiarse del ahorro en esta industria es de 5.052 habitantes, que podrían disponer agua diariamente.

3.1.5. Análisis de sensibilidad y riesgo

Inicialmente se definen las variables que impactaran en la generación de ahorro de agua, lo que se traduciría en un ahorro monetario neto en la operación del circuito de refrigeración, que es el objetivo que dará viabilidad al proyecto. Se consideran las siguientes variables

- Calidad química del agua potable
- Costo de suministro de agua potable
- Costo de tratamiento de efluente (alcantarillado)

- Costo de inversión en equipamiento e instalación
- Costo de operación
- Costo de consumibles (membranas)
- Costo tratamiento químico

En el caso de que la calidad de agua desmejore en un 10 %, el diseño del sistema de filtración por membranas absorbe este aumento, sin necesidad de tener que variar las condiciones de operación en cuando a la recuperación y rechazo de la unidad de RO. En resumen, se puede mostrar el impacto en la siguiente tabla 3.11

| Tabla 3.11 Incidencia en el CAE en una modificación del 10% de Variables que influyen en el proyecto | | |
|--|-----------|----------------------|
| | Variación | Incidencia en el CAE |
| Calidad química del agua potable | 10% | No hay impacto |
| Costo de suministro de agua potable | 10% | 2% |
| Costo de tratamiento de efluente (alcantarillado) | 10% | 5% |
| Costo de inversión en equipamiento e instalación | 10% | -2% |
| Costo de instalación | 10% | -1% |
| Costo de operación | 10% | -2% |
| Costo de consumibles (membranas) | 10% | -1% |
| Costo tratamiento químico | 10% | 7% |

3.2. Caso De Análisis. Circuito De Refrigeración Planta Productora De Energía

3.2.1. Definición de objetivos

El objetivo de análisis en este caso es determinar la posibilidad de disminuir el consumo de agua en el circuito de refrigeración, la utilización de tecnología de filtración por membranas es la herramienta para conseguir este fin.

3.2.2. Identificación del proyecto y análisis de viabilidad

Se analizará el caso de una planta generadora de energía eléctrica, del tipo ciclo combinado, en la zona central de Chile. Esta unidad de generación de aproximadamente 370 MW de potencia nominal cuenta con una turbina de generación a gas y una turbina de generación a vapor. Esta unidad utiliza un circuito de refrigeración del tipo recirculación abierta, utilizando una torre de refrigeración. El detalle de operación del circuito de agua de refrigeración se muestra a continuación en la tabla 3.12

Tabla 3.12. Condiciones de operación actual del circuito de refrigeración. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Tipo de Sistema | | Recirculación abierta |
| Numero de celdas | Unidades | 12 |
| Tasa recirculación máxima | m ³ /h | 31.000 |
| Consumo de agua de reposición | m ³ /h | 399 |
| Purga | m ³ /h | 181 |
| Evaporación | m ³ /h | 217 |
| Ciclos de concentración en operación | Adim. | 2,2 |

La fuente de agua de reposición corresponde a agua de pozo, es extraída mediante el uso de 5 pozos profundos (180 m). El proyecto cuenta con un derecho de aprovechamiento de agua DAA de hasta 233 l/s que equivalen a 839 m³/h. La caracterización del agua que se utiliza como agua de reposición al circuito de refrigeración se muestra en la tabla 3.13

Tabla 3.13. Caracterización agua de reposición al circuito de agua de refrigeración. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|--------------------|--------------|
| pH | Adim. | 7,37 |
| Conductividad | <i>micromho/cm</i> | 1.357 |
| TDS (solidos totales disueltos) | mg/l | 909 |
| Dureza Total | mg/l | 685 |
| Dureza Cálcica | mg/l | 545 |
| Alcalinidad | mg/l | 180 |
| Sílice | mg/l | 31 |
| Cloruros | mg/l | 153 |
| Sulfatos | mg/l | 250 |

La operación de este circuito cuenta con una Resolución de Calificación Ambiental, RCA, que le permite descargar el efluente del circuito de agua de refrigeración a un río. La normativa de concentración máxima de contaminantes, corresponde al Decreto Supremo N°90 tabla N°1. La característica del efluente de este circuito, se describe en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Caracterización agua de purga del circuito de agua de refrigeración. Fuente: elaboración propia.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|--------------------|--------------|
| pH | Adim. | 8,30 |
| Conductividad | <i>micromho/cm</i> | 2.985 |
| TDS (solidos totales disueltos) | mg/l | 2.000 |
| Dureza Total | mg/l | 1.507 |
| Dureza Cálcica | mg/l | 1.200 |
| Alcalinidad | mg/l | 190 |
| Sílice | mg/l | 67 |
| Cloruros | mg/l | 337 |
| Sulfatos | mg/l | 753 |

Los principales problemas que pueden presentarse, observando el D.S N°90, (ver anexo 7.4.1) está en los cloruros y sulfatos, donde al aumentar la concentración, estos parámetros pueden superar el máximo permitido para la descarga a cuerpo fluvial.

La estrategia de tratamiento, buscando ahorrar agua, se basa en la reducción de la purga del circuito de agua refrigeración, para esto, se debe concentrar el agua de enfriamiento, pero como existen límites químicos que se deben respetar para evitar procesos de precipitación de sales, se debe disminuir la concentración de agua de reposición al circuito. Para esto, se recomienda el uso de una planta de osmosis inversa, que elimine sales disueltas de la corriente de reposición. Con lo cual, se podría aumentar la concentración en el circuito, disminuyendo la purga y disminuyendo así, el consumo global de agua de reposición.

Se debe tener en cuenta, que el rechazo de la planta de osmosis inversa, se debe mezclar con el agua de purga del circuito de agua de enfriamiento para generar un efluente que cumpla con la normativa vigente de descarga a cuerpo fluvial, así definida en la RCA correspondiente.

En definitiva, se puede explicar en un diagrama la idea, que es conceptualmente la misma para el tratamiento en el centro de datos. La figura 3.2 lo explica:

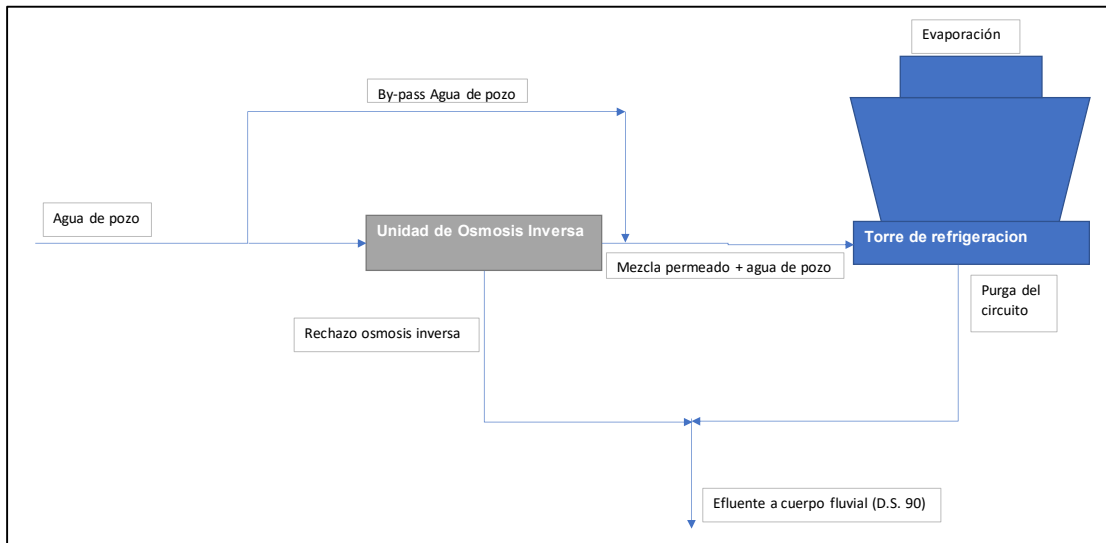


Figura 3.2. Diagrama simplificado de la propuesta de solución para reducción de consumo en planta productora de energía. Fuente: elaboración propia

Para encontrar el tamaño de la planta de osmosis y cuáles serían las condiciones óptimas de operación y como quedo expuesto en el apartado de metodología, se requiere iterar definiendo inicialmente el porcentaje de agua que será tratado en la

planta de osmosis del total de agua proveniente de los pozos, luego diseñar la unidad de osmosis inversa para ese caudal, a continuación, simular la mezcla de agua que conformará el agua de reposición del circuito de agua de refrigeración, para luego simular las condiciones de operación del circuito. Una vez obtenida la caracterización de la calidad de agua de purga, se simula la mezcla de esta con el rechazo de la planta de osmosis. Para finalmente comparar si la calidad de este efluente, que va al alcantarillado cumple con la normativa (D.S. N°90, Tabla N°1) Si no se alcanza la calidad requerida, se debe nuevamente iniciar el proceso, hasta obtener el resultado optimo.

Terminado el proceso anterior, los resultados de las iteraciones entrega el siguiente resultado, que se muestra en la tabla 3.15

Tabla 3.15. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---|-------------------|--------------|
| Consumo de agua de pozo | m ³ /h | 365 |
| Agua ingreso a planta de osmosis | m ³ /h | 185 |
| Derivación agua potable | m ³ /h | 180 |
| Agua Permeado planta de osmosis inversa | m ³ /h | 120 |
| Agua Rechazo Planta de Osmosis inversa | m ³ /h | 194 |
| Porcentaje recuperación planta de osmosis | % | 65 |
| Reposición Torre de enfriamiento | m ³ /h | 298 |
| Purga Torre de enfriamiento | m ³ /h | 80,5 |
| Efluente hacia cuerpo fluvial | m ³ /h | 274 |
| Evaporación | m ³ /h | 217 |

La calidad de las corrientes es la siguiente, que se muestra en la tabla 3.16. Se destacan los parámetros cloruros y sulfatos, los cuales son los limitantes en este caso

Tabla 3.16. Calidades de agua como resultado del uso de planta de osmosis inversa. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Agua pozo | Producto OI | Rechazo OI | Mezcla OI + Pozo | Efluente descarga |
|-----------------|--------------------|-----------|-------------|------------|------------------|-------------------|
| Flujo | m ³ /h | 365 | 120 | 194 | 298 | 274 |
| pH | Adim | 7,37 | 5,81 | 7,74 | 7,17 | 8,30 |
| Conductividad | <i>micromho/cm</i> | 1.357 | 45 | 3.350 | 865 | 3.267 |
| TDS | mg/l | 909 | 25 | 2.633 | 573 | 2.189 |
| Dureza Total | mg/l | 685 | 18 | 1.925 | 418 | 1.716 |
| Dureza Cálctica | mg/l | 545 | 15 | 1.530 | 334 | 1.366 |
| Alcalinidad | mg/l | 180 | 6 | 506 | 110 | 384 |
| Sílice | mg/l | 31 | 0,9 | 86 | 19 | 77 |
| Cloruros | mg/l | 153 | 4,6 | 446 | 97 | 398 |
| Sulfatos | mg/l | 250 | 3,8 | 707 | 152 | 669 |

Las dimensiones de la planta de osmosis inversa, corresponde a las siguientes, expresadas en la tabla 3.17. Esto corresponde a una unidad de 100 m³/h, por lo que es necesario la adquisición de 3 unidades iguales para suplir la cantidad de agua requerida.

Tabla 3.17. Descripción básica de la unidad de Osmosis Inversa. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------|-------------------|-------------|
| Numero elementos | # | 108 |
| Flux promedio | lmh | 11,6 |
| Presión | bar | 4,59 |
| Recuperación | % | 65 |
| Flujo entrada | m ³ /h | 121,54 |
| Flujo producto | m ³ /h | 100 |
| Flujo rechazo | m ³ /h | 21,5 |
| Potencia consumida | kW | 11,95 |
| Antiincrustante | mg/l | 3,49 |
| Tipo elemento | - | AG8040F 400 |

De los datos de caudal de agua de pozo obtenido, en este caso (365 m³/h) se compara con el caso de operación normal sin planta de osmosis (398 m³/h) la diferencia es de tan solo 33 m³/h.

3.2.3. Análisis Financiero

Para evaluar alternativas de ahorro de agua, se debe valorizar el costo de extraer el recurso. Para este caso, el costo de extracción, que conlleva el costo de energía, más el costo de mantenimiento de las bombas de pozo es de 0,13 USD/m³, estimado por el usuario basado en los costos de los últimos años. Por otro lado, se considera que la unidad tiene una autorización de operación de 330 días por año, según resolución de calificación ambiental al inicio de la operación. Finalmente, el costo de operación de la unidad en términos del recurso hídrico es la que se presenta a continuación en la tabla 3.18.

Tabla 3.18. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|----------------|-------------------|
| Costo anual de agua pozo | USD/año | \$ 410.810 |
| Costo anual tratamiento químico | USD/año | \$ 152.042 |
| Costo total anual | USD/año | \$ 562.852 |

El apartado tratamiento, se considera un tratamiento estándar, que se basa en la inyección de productos químicos como: anticorrosivo, antiincrustante y biocida para control microbiológico. La inyección está directamente relacionada con la tasa de purga del circuito de enfriamiento.

Entonces considerando el mismo tiempo de operación anual y el costo de la obtención del agua, sumado a la reducción del tratamiento por disminución de purga tenemos el siguiente resultado financiero.

Tabla 3.19. Costo anual de operación, considerando costo de agua y tratamiento químico. Caso circuito con planta de osmosis inversa. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | unidad | Valor |
|---------------------------------|----------------|-------------------|
| Costo anual de agua pozo | USD/año | \$ 375.804 |
| Costo anual tratamiento químico | USD/año | \$ 80.947 |
| Costo total anual | USD/año | \$ 456.751 |

La diferencia en costo anual de operación entre las dos soluciones es de **USD 106.102**

Se estima el costo de instalación y operación, basado en una cotización estándar de unidades de osmosis inversa de importante proveedor en Chile.

Tabla 3.19. Costos de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta de producción de energía. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Costo equipamiento | USD | \$ 900.000 |
| Costo membranas | USD | \$ 210.000 |
| Costo instalación | USD | \$ 200.000 |
| Costo anual de operación | USD/año | \$ 28.512 |

Realizando el mismo tratamiento financiero, buscando el coste anual equivalente de la inversión, considerando una vida útil de la planta de osmosis de 10 años, con un reemplazo de las membranas cada 3 años, y una tasa de descuento de un 8%, tenemos el siguiente resultado que se muestra en la tabla 5.20.

Tabla 3.20. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta producción de energía. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--|----------------|-------------------|
| Costo anual equipamiento e instalación | USD/año | \$ 163.932 |
| Costo anual membranas | USD/año | \$ 81.487 |
| Costo anual de operación | USD/año | \$ 28.512 |
| Costo Total anual | USD/año | \$ 273.931 |

Finalmente, si se considera el costo anual equivalente de la inversión menos el ahorro producido por la operación de la planta de osmosis inversa, queda un saldo negativo de USD (- 167.829) monto que anualmente debería la productora de energía, desembolsar para hacer de este proyecto viable.

Dado que la reducción de consumo de agua, en el caso anterior, no es suficiente para compensar el costo de la inversión, se propone una segunda alternativa, con la misma unidad de osmosis inversa, pero considerando algunos cambios en la operatividad del circuito de agua de refrigeración y con un cambio en el destino final del efluente.

Inicialmente, se considera que el flujo de evaporación es de 217 m³/h, ver tabla 3.15 y dada que la calidad de agua producida por la planta de osmosis es baja en sales disueltas, podemos reponer el circuito de agua de refrigeración solo con permeado (producto de las plantas de osmosis) esto provocara que la purga del circuito se cierre casi completamente y concentre hasta valores cercano a valores de 76 veces. Podemos resumir el funcionamiento de este sistema en la siguiente tabla 3.21. Además, las torres de refrigeración en su diseño y considerando el uso de ventiladores para la circulación de aire, se da el fenómeno de arrastre (*The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*), donde parte del agua es arrastrada por el flujo de aire fuera de la torre, convirtiéndose esto en parte de la purga. Una consideración típica de estimación de este flujo es del 0,01% del flujo de recirculación, que para este caso corresponde a 2,9 m³/h. Siendo igual a la tasa de purga para 76 ciclos de concentración, dicho en otras palabras, se puede cerrar la purga y mantener una concentración, utilizando solo la perdida de agua por arrastre.

Tabla 3.21. Condiciones de operación con uso de planta de osmosis inversa para uso directo en circuito de agua de refrigeración. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Agua pozo | Producto OI | Rechazo OI | Purga circuito | Efluente |
|----------------|------------------------|------------|-------------|------------|----------------|-----------|
| Flujo | m³/h | 288 | 225 | 63 | 2,9 | 63 |
| pH | Adim | 7,37 | 5,67 | 7,86 | 8,20 | 7,86 |
| Conductividad | <i>micromho/cm</i> | 1.357 | 33 | 5.297 | 2.508 | 5.297 |
| TDS | mg/l | 909 | 22 | 6.458 | 1.680 | 6.458 |
| Dureza Total | mg/l | 685 | 12 | 3.076 | 943 | 3.076 |
| Dureza Cálcica | mg/l | 545 | 11 | 2.445 | 833 | 2.445 |
| Alcalinidad | mg/l | 180 | 3 | 803 | 168 | 803 |
| Sílice | mg/l | 31 | 0.5 | 137 | 45 | 137 |
| Cloruros | mg/l | 153 | 3.6 | 797 | 278 | 797 |
| Sulfatos | mg/l | 250 | 2.6 | 1129 | 196 | 1129 |

Ahora bien, para que esta alternativa sea viable, se tiene que disponer el rechazo de la planta de osmosis inversa de otra manera, ya que este efluente no cumple con la legislación para ser desechada en un cuerpo de agua fluvial. (D.S. N°90 tabla N°1) Aquí viene una solución que en algunos casos se ha implementado, que es vender este efluente a algún proceso industrial que lo pueda reutilizar. Actualmente existe precedente de esta práctica bajo un contrato de venta de parte del efluente

de aguas de refrigeración entre dos plantas productoras, una de producción de energía y una minera de cobre ambas en la zona central de Chile.

Inicialmente se debe gestionar una “pertinencia” ante el servicio de Evaluación ambiental, quienes revisan los alcances y solicitan realizar el estudio de impacto ambiental si es necesario. Para el caso precedente, en 2014 se ingresó la pertinencia y el 2015 fue Emitida la Resolución Exenta N°336 del 13 de octubre de 2015 del Servicio de Evaluación Ambiental, que autorizaba bajo ciertas condiciones, la valorización de parte del efluente de las aguas de enfriamiento de las unidades generadoras, para su entrega y uso en procesos industriales terceros. Esto generó un proyecto de venta del efluente entre las partes, que hasta hoy se mantiene en funcionamiento.

Dado que existe este precedente, y desconociendo la valorización del efluente en términos de precio de compra y venta del recurso, se propone realizar el ejercicio de estimar un precio del efluente generado en este caso, y realizar el estudio económico del proyecto completo, considerando como parte del proceso la venta de los 63 m³/h de efluente, producidos por el proceso de generación de agua de reposición para el circuito de enfriamiento, mediante la planta de osmosis inversa. Comparando, en este caso, el consumo de agua de pozo en la condición de operación normal actual, con respecto a esta solución de uso de agua de osmosis como reposición al circuito, existe una reducción de consumo desde 399 m³/h (ver tabla 5.11) a 288 m³/h (ver tabla 3.21), lo que representa 111 m³/h que valorizado en costo de extracción se obtiene 14,43 UDS/h de ahorro.

Ahora bien, poniendo en resumen los costos de inversión y operación de la planta de Osmosis Inversa, que se considera la misma que en el caso anterior, utilizando el método de Costo Anual Equivalente, para el caso de la inversión. Sumándole es nuevo costo por extracción de agua de pozo (ya que al disminuir el uso, hay una disminución de costo) y restándole el monto por venta de efluente proveniente del rechazo de la planta de osmosis, a lo cual se define un costo por metro cubico, haciendo que el resultado de esta operación sea cero. Se tiene el siguiente cuadro, expresado en la tabla 3.22.

Tabla 3.22. Costos anuales de instalación y operación de planta de osmosis para el caso de planta producción de energía restando ahorro de agua de pozo y venta de agua de efluente. Fuente: elaboración propia

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-------------------------------------|---------------|--------------|
| CAE equipamiento e instalación | USD/año | \$ 134.127 |
| CAE Instalación | USD/año | \$ 29.806 |
| CAE membranas | USD/año | \$ 125.185 |
| Costo anual de operación planta RO | USD/año | \$ 28.512 |
| Costo de extracción de agua de pozo | USD/año | \$ 296.525 |
| Venta de efluente | USD/año | \$ 695.101 |

Para mayor claridad, el precio del efluente que se definió en virtud de que el Costo Anual Equivalente de la inversión, esto es, Costo equipamiento e instalación más costo de membranas más el costo de operación, más el costo de extraer el agua de pozo, menos la venta del efluente sea cero, es **1,39 USD/m³**

Con esto se puede decir que, en 10 años, con una tasa de descuento del 8% (*Dietmar Brakemeier, Fitchner, Evaluación Económica entre Osmosis Inversa (RO) y Desalinización Solar Térmica, 2015*) y un precio de venta de **1,39 USD/m³** el proyecto es viable financieramente.

Adicionalmente se realiza un análisis de flujo de caja del proyecto, que se muestra en la tabla 3.23. donde se puede observar el VAN de USD 179.086 y una tasa interna de retorno del 11,08%. Siendo este proyecto periodo de pago de la inversión a los 7 años de operación del proyecto.

Tabla 3.23. Sostenibilidad financiera

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Costo equipamiento | 900.000 | | | | | | | | | | |
| Costo membranas | 210.000 | | | | | | | | | | |
| Costo instalación (estimado) | 200.000 | | | | | | | | | | |
| Costo anual de operación | | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 | 28.512 |
| (1) Costo implementación y operación | 1.310.000 | 28.512 | 28.512 | 238.512 | 28.512 | 28.512 | 238.512 | 28.512 | 28.512 | 238.512 | 28.512 |
| Costo anual de agua pozos | | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 | 296.525 |
| Costo anual tratamiento químico | | 80.947 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 | 89.042 |
| (2) Costo agua + tratamiento químico | | 377.472 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 | 385.567 |
| (3) Venta de efluente | | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 | 695.101 |
| Flujo neto (3) - (2) - (1) | -1.310.000 | 289.117 | 281.023 | 71.023 | 281.023 | 281.023 | 71.023 | 281.023 | 281.023 | 71.023 | 281.023 |
| Flujo Acumulado | -1.310.000 | -1.020.883 | -739.860 | -668.838 | -387.815 | -106.793 | -35.770 | 245.252 | 526.275 | 597.297 | 878.320 |
| VAN | | 179.086 | | | | | | | | | |
| TIR | | 11,08% | | | | | | | | | |

3.2.4. Análisis Económico

Se puede también observar el impacto en la productividad en otras áreas de la economía al reducir el consumo de agua que se utiliza para la refrigeración de los procesos antes analizados. Por ejemplo, se realizó un estudio de los servicios de agua en Chile (Paz, 2020) y se estimó la productividad (pesos chilenos por metro cubico de agua) del rubro agropecuario y del rubro industrial rubros en 2 zonas de Chile, Norte y Centro-Sur. Considerando una reducción en el consumo de agua en el caso de la planta generadora de energía, de 111 m³/h en un tiempo de operación anual de 330 días, se tiene un volumen neto de ahorro de 0,879 Hm³/año, que bien pueden ser utilizados en otros procesos productivos. Ahora bien, según (Paz, 2020) la productividad en el rubro industrial a nivel nacional, es de CLP 7.099,44 por metro cubico de agua consumida. Considerando una inflación desde 2020 de 17,1% (INE, 2022) la productividad en el rubro industrial actualizada por inflación es de CLP 8.313,44 que en términos de dólares (tasa de cambio 1 USD = CLP 884,03) el valor es USD 9,40 por metro cubico. Finalmente, la productividad adicional al año, producido por el ahorro de agua corresponde a **USD 7M**.

Si se realiza el mismo ejercicio con la productividad en el rubro minería a nivel nacional, donde la productividad es de CLP 43.244,68/m³, que en términos de dólares hoy es USD 48,91/m³. Para el ahorro de agua de 0,879 Hm³ por año se obtienen **USD 43M**.

En resumen, utilizando los indicadores de productividad nacional se estima que el aumento de productividad impulsada por el proyecto de reducción de consumo de agua de 111 m³/h por la utilización de tecnología de desalación, se puede observar en la siguiente tabla 3.23.

Tabla 3.24: Productividad en USD proveniente de reducción de uso de agua, para el caso analizado

| Rubro | Productividad CLP/m3 | Productividad USD |
|--------------|-------------------------|----------------------|
| Agropecuario | \$ 1.714,83 | \$ 1.705.306 |
| Minería | \$ 43.244,68 | \$ 43.004.494 |
| Industria | \$ 7.099,44 | \$ 7.060.009 |

Siguiendo el análisis y tomando el valor de productividad del rubro minero, que es USD 48,91/m³, el precio de compra del efluente que genera el proyecto de reducción de uso de agua, que en el peor caso es de USD 1,39/m³ representa solo el 2,5% del total del beneficio por metro cubico de agua utilizada, lo que implica, que tanto para el rubro minero, como para el rubro industrial, en caso de escasez, se hace atractivo un negocio de reducción de uso y posterior venta de efluentes que cumplan con las calidades de agua que el proceso necesita.

Ahora bien, si se analiza desde el punto de vista que el ahorro de agua de pozo podría trasladarse a la producción de agua potable, se podría realizar el mismo ejercicio, considerando la primera solución, que equivale a un ahorro de agua de tan solo 34 m³/h, la cantidad de habitantes que pueden beneficiarse de este ahorro es de 4.772 habitantes.

Finalmente, si consideramos la solución que conlleva la venta del efluente, se tiene un ahorro neto de agua de 111 m³/h, los habitantes que se pueden beneficiar del ahorro de agua de esta planta son alrededor de 15.579 personas, aproximadamente la cantidad de clientes que abastece la empresa Sacyr Aguas Santiago, teniendo un área de concesión que se puede observar en la figura 3.2

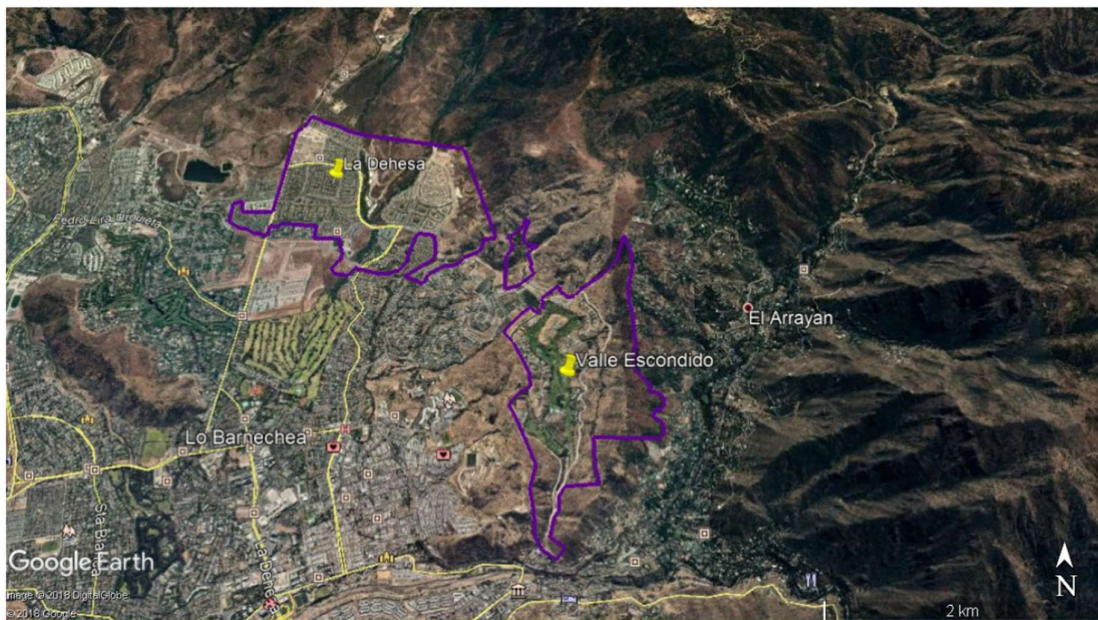


Figura 3.2: Área de concesión de Sacyr Aguas Santiago. Tomada de <https://www.sacyraguasantiago.cl/>

3.2.5. Análisis de sensibilidad y riesgo

Al igual que en el caso anterior, se definen las principales variables que impactaran en la generación de ahorro de agua, lo que se traduciría en un ahorro monetario neto en la operación del circuito de refrigeración. Se consideran las siguientes variables

- Calidad química del agua de pozo
- Costo de extracción de agua de pozo
- Costo de inversión en equipamiento
- Costo de instalación
- Costo de operación
- Costo de consumibles (membranas)
- Costo tratamiento químico
- Precio de venta del efluente

En el caso de que la calidad de agua desmejore en un 10% (aumento de concentración de sales en un 10%) el diseño del sistema de filtración por membranas absorbe este aumento, sin necesidad de tener que variar las condiciones de operación en cuando a la recuperación y rechazo de la unidad del sistema de filtración por membranas. Por otro lado, en este análisis, tomaremos el balance de todos los costos menos la venta del efluente como parámetro de comparación, para estimar el impacto del aumento de cada variable en el resultado final del ejercicio. En resumen, se puede mostrar el impacto en la siguiente tabla 3.25

| | Variación | Incidencia Costos-Venta |
|-------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Calidad química del agua de pozo | 10% | No hay impacto |
| Costo de extracción de agua de pozo | 10% | -4,3% |
| Costo de inversión en equipamiento | 10% | -2,0% |
| Costo de instalación | 10% | -0,4% |
| Costo de operación | 10% | -0,4% |
| Costo de consumibles (membranas) | 10% | -2,0% |
| Costo tratamiento químico | 10% | -1,2% |
| Precio de venta de efluente | 10% | 9,1% |

4. DISCUSIÓN

La metodología de análisis costo-beneficio, otorga una herramienta conveniente en determinar la decisión de llevar a cabo un proyecto de ahorro de agua, ya que entrega aspectos adicionales, basado en enfoque de impacto económico, que en general las industrias no consideran al momento de decidir si implementar o no estos proyectos. Dado que las iniciativas en general son privadas, sería importante generar políticas que incentiven el esfuerzo de ahorros agua en la industria, mostrando el impacto económico y de bienestar que conlleva la ejecución de estas iniciativas.

Como premisa en el análisis, se busca que el ahorro financiero de las alternativas tecnológicas, sea en magnitud lo suficiente para pagar los costes de inversión y operación de estos proyectos, pero como se vio en el análisis, valorar los residuos, en este caso el efluente de las plantas de osmosis, permite incluso entregar un incentivo financiero mayor al hecho de invertir por ahorrar agua, en beneficio del bienestar económico de la región, con esto, se abre la oportunidad de hacer más atractivos estos proyectos.

Los parámetros químicos en el agua de un circuito de refrigeración son la clave para determinar cuánta agua consumirá el sistema. La calidad de agua de reposición es fundamental al determinar cuánto se puede concentrar el agua, evitando los procesos de precipitación de sales que tanto afectan el desempeño de refrigeración de estos sistemas, es por esta razón, que la solución enfocada a la reducción de sales disueltas en el agua de reposición, brinda una poderosa herramienta para hacer de los circuitos de agua de refrigeración más eficientes y menos consumidores de agua fresca, sea esta superficial o subterránea. El problema surge cuando se debe disponer los efluentes generados, i.e. el rechazo de la planta de osmosis, que virtualmente no cumple con la normativa de descarga en cuerpos de agua fluvial, o lacustres, siendo esta la mayor dificultad en la implementación de las soluciones planteadas.

En el caso de análisis del circuito de refrigeración del centro de datos, se puede observar que el aumento de concentración, producido por la reducción de purga del

circuito, esto gracias a la menor cantidad de sales disueltas en el agua de reposición, por el trabajo de la planta de osmosis, trae una reducción importante en el costo de tratamiento químico del agua. Esta reducción equivale al 62% del ahorro neto, cuando se compara la operación sin proyecto de reducción de consumo, con el costo final del proyecto anualizado. Según las estimaciones, anualmente se puede reducir en USD 317.000 el costo de tratamiento químico, por reducción de purga del circuito. Lo cual hace muy atractivo el proyecto desde el punto de vista financiero.

La necesidad de reducir el uso de agua al nivel de enfriamiento industrial es importante, debido a los volúmenes que utilizan estos procesos no son despreciables, y el aporte de estos proyectos hacia la comunidad en términos, no solo de disponibilidad del recurso, sino también, del aumento de productividad a la actividad económica, como aquellos con un gran valor, como es la minería.

Queda por analizar, si se puede obtener mejores beneficios financieros con otras tecnologías, incluso pensar si es posible reducir costes de inversión y operación, utilizando Electro-deionización (EDI), Electrodiálisis reversible EDR. Incluso tecnologías de efluente cero, donde todo el efluente es reutilizado, reduciendo el consumo neto de agua del circuito y las sales son cristalizadas y valorizadas como producto secundario.

5. CONCLUSIONES

Finalmente, de lo expuesto en este trabajo podemos concluir lo siguiente:

1. Existe un extenso entendimiento de los procesos de refrigeración industrial con agua como refrigerante. Las variables físico químicas controlan la eficiencia en cuanto al uso del recurso hídrico, siendo la concentración de sales disueltas uno de los principales factores limitantes al momento de intentar optimizar los procesos y reducir el consumo de agua.
2. La disminución de sales disueltas en el agua de reposición de los circuitos de agua de refrigeración, es la principal herramienta utilizada para disminuir el uso del recurso hídrico. Lo anterior se logra mediante tecnología filtración por membranas, no siendo la única.
3. La implementación de soluciones de reducción de uso de agua, está fuertemente relacionado a la legislación medioambiental vigente, siendo esta ultima la que definirá el cómo se desechará el efluente generado y las condiciones de operación de los sistemas que se implementen.
4. La viabilidad económica de las soluciones de reducción de uso de agua está relacionadas a la fuente de agua disponible, ya sea, agua potable, agua de pozo, agua fluvial, etc. Debido principalmente al costo de obtener el recurso, ya que, a mayor costo de obtención, mejores perspectivas que el proyecto sea viable económicamente.
5. Disponer de alternativas para desechar o aprovechar los efluentes, puede generar una oportunidad de llevar a cabo un proyecto de mejora. La posibilidad de vender el efluente a un tercero para ser reutilizado, brinda a quien desea llevar adelante un proyecto de reducción de uso de agua, la oportunidad de no solo viabilizar el proyecto, sino también incluso darle rentabilidad por encima de la inversión.
6. La implementación de soluciones que ahorren agua en los procesos de enfriamiento, genera un beneficio directo al aumentar el nivel del recurso y una potencial mejora en el bienestar económico.

6. BIBLIOGRAFIA

Chang, Química, Séptima Edición, 2002, Mc Graw Hill

Degrémont, Manual técnico del agua, Cuarta Edición, 1979, Bilbao

DGA, Atlas del agua (2016). Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Publicas

Daniel J. Flynn, *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition*, 2018, Mc Graw Hill

Dietmar Brakemeier, Fitchner, (2015) Evaluación Económica entre Osmosis Inversa (RO) y Desalinización Solar Térmica. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Eric Masanet, Arman Shehabi, Nuoa Lei, Sarah Smith and Jonathan Koomey, (2020) *Recalibrating global data center energy-use estimates*, Science, 367

Guía del Análisis Coste-beneficios de los proyectos de inversión, (2003) [Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión \(europa.eu\)](#) Accedido el 6 de noviembre de 2022

Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook*, 2015, Wiley, Palo Alto, CA

Kurita, *Handbook of Water Treatment*, 1999, KURITA WATER INDUSTRIES LTD. Tokyo

Nalco Chemical Company, Manual del Agua, 1989, Mc Graw Hill

Paz, (2020), Análisis económico de los servicios del agua en Chile, Propuesta para un cambio de legislación. Proyecto de fin de máster. Universidad de Alcalá de Henares, Madrid

Ley N°21435, Reforma El Código de Aguas, 2022, Ministerio de obras Publicas

7. ANEXOS

Anexo 7.1. El agua como medio de refrigeración

Uno de los tantos usos del agua, a nivel industrial, es la que se denomina refrigeración. En simples palabras la refrigeración es el transporte de energía, en forma de calor, desde un cuerpo con mayor temperatura (la fuente) a otro cuerpo con menor temperatura (el receptor) (Manual del Agua, *Nalco Chemical Company*, 1989) Las características fisicoquímicas del agua, sumado a su relativa abundancia e inocuidad, le confieren la ventaja como fluido que pueda transportar calor en desmedro de otros fluidos que pudieran tener características fisicoquímicas superiores en cuanto a transferencia de calor. Pero los procesos industriales requieren en su mayoría, transportar grandes cantidades de calor y disiparlas al medio ambiente de manera eficiente y económicamente factible.

Un aspecto importante a tener en cuenta al utilizar el agua como medio refrigerante es la capacidad de transportar calor, si consideramos una masa definida de agua y se eleva la entalpía de esta masa, aplicando por ejemplo calor, la temperatura de esta masa aumentará, pero lo interesante viene dado que para realizar un cambio de estado de esta masa de agua, de líquido a vapor, se requiere más de 5 veces de energía (ver figura 7.1) por lo tanto evaporar agua es una herramienta eficaz para disipar calor al medio ambiente, esta característica del agua, permitirá entender los procesos de enfriamiento por evaporación.

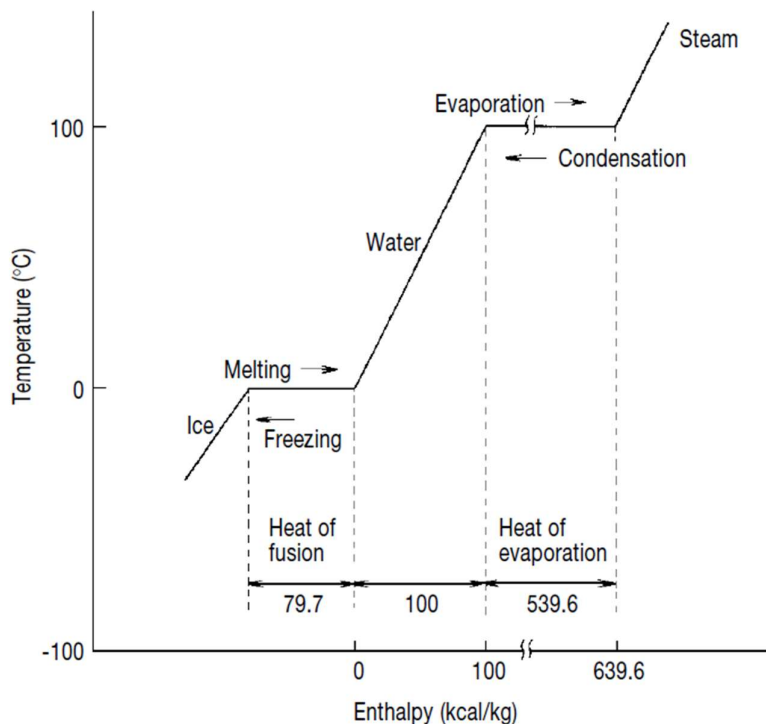


Figura 7.1 Relación entalpía vs temperatura del agua. tomada de Kurita Handbook of Water Treatment, 1999

Anexo 7.2. Tipos de sistemas de refrigeración

El calor generado en los procesos industriales, deben ser disipados en el medio ambiente, esto se realiza con circuitos de agua de refrigeración. Existe una clasificación aceptada en la industria, basada en cómo se utiliza el agua de refrigeración: sistema de un paso, sistema cerrado (no evaporativo) y sistema de recirculación abierta (evaporativo) (*The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*) La diferencia entre un proceso no evaporativo y un proceso evaporativo consiste en que el primero, el proceso de enfriamiento es gobernado por la capacidad calorífica específica del agua, que en términos energéticos es de 4,19 (KJ/Kg °C) mientras que el proceso evaporativo requiere de 2.300 kJ/Kg. Lo que implica que, bajo ciertas condiciones de operación, la evaporación puede eliminar entre 50 a 100 veces más calor que el proceso no evaporativo.

7.2.1. Sistema de un paso

Este sistema consiste en tomar agua de una fuente, ya sea un lago, un río, por lo general de alto caudal y utilizar directamente esta agua para enfriar los sistemas industriales. Luego de esto, el agua es retornada nuevamente a la fuente. Este es un proceso no evaporativo, entonces es necesario grandes cantidades de agua para disipar el calor generado en los procesos productivos, siendo desde el aspecto de gestión del recurso hídrico, una solución poco amigable con el medio ambiente, sin considerar los riesgos de impacto medioambiental que estos sistemas pueden generar. Un diagrama simplificado de este sistema se muestra en la figura 4.3.

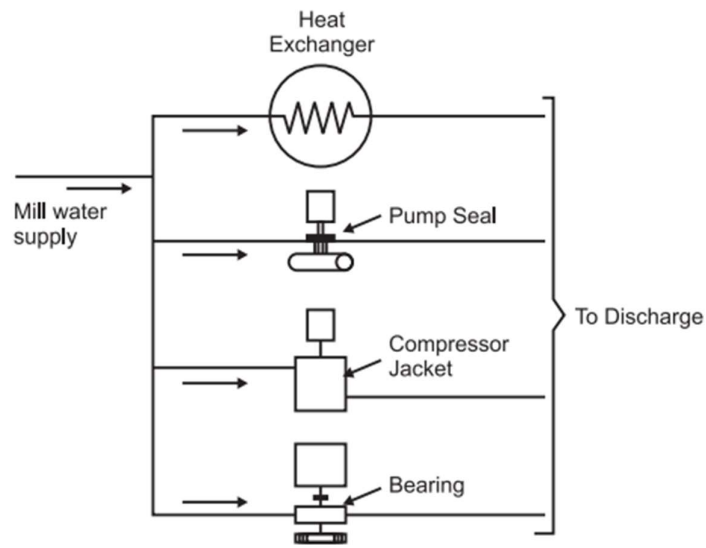


Figura 7.2 Sistema de enfriamiento de un paso, tomada de *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*

7.2.2. Sistema cerrado

El sistema cerrado consiste en un circuito que contiene agua y que enfría el proceso por contacto indirecto, tal como un sistema de un paso, este sistema es de tipo no evaporativo, pero a diferencia del sistema de un paso, la cantidad de agua utilizada es definida por el tamaño del proceso a enfriar y se reutiliza indefinidamente. Estos sistemas, transportan el calor generado en el proceso y luego para disiparlo al medio ambiente, requieren de otro sistema de refrigeración secundario, por lo general se utilizan sistemas de recirculación abierta (ver figura 4.4)

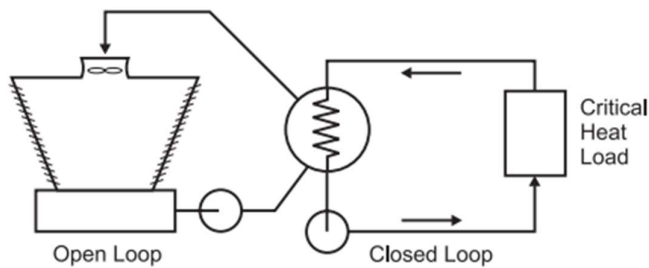


Figura 7.3 Sistema cerrado de enfriamiento, tomada de *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*

7.2.3. Sistema de recirculación abierta

Estos sistemas, al igual que el sistema cerrado de refrigeración, son circuitos, esto es, utilizan el agua una y otra vez para enfriar los procesos industriales, pero a diferencia de los anteriores, estos circuitos enfrían mediante la evaporación. En la figura 7.4, se puede observar un diagrama simplificado de estos circuitos

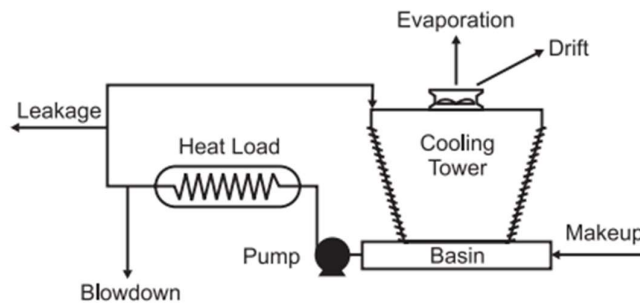


Figura 7.4 Sistema de enfriamiento por recirculación abierta, tomada de *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*

Estos sistemas utilizan, lo que se conoce como torre de refrigeración, lugar donde ocurre el proceso de enfriamiento por evaporación. El agua que ha tomado calor desde el proceso, llamado carga térmica, lleva una mayor temperatura y es puesta en contacto directo con el aire ambiente, a una menor temperatura y humedad relativa, en la torre de enfriamiento. En esta unidad parte del agua se evapora, transfiriendo el calor hacia el aire, enfriándose el agua, y el aire se satura de vapor. Este último es enviado al medioambiente, provocándose así la extracción y

disipación del calor del proceso productivo. Una vez enfriada el agua, es reutilizada una vez más y el proceso se repite indefinidamente.

La evaporación del agua provoca una pérdida másica del medio refrigerante, para compensar esto, se repone agua al circuito en la medida que sea necesario. A este flujo de agua, se le denomina, agua de reposición o reposición (*Make Up* o MU en inglés) La reposición contiene sales disueltas, como también sólidos sedimentables, dependiendo de la fuente de agua donde sea extraído. Dado también que la evaporación, solo elimina agua, sin componentes disueltos, en un tiempo definido, la concentración de estos compuestos disueltos aumentará. Para controlar este aumento de concentración, se debe eliminar agua del circuito y reponer agua nuevamente. A este flujo se le denomina purga del circuito (*Blowdown* o BD en inglés) Estos últimos dos conceptos serán fundamentales para entender la magnitud del uso del recurso hídrico, ya que el aumento de purga en un circuito, implicará el aumento de agua de reposición, o sea, un aumento en la extracción y disposición del recurso.

Ahora bien, se puede generar un parámetro que mida la eficiencia en el uso de agua, con respecto a los parámetros de flujos de reposición y purga. Este parámetro se denomina ciclos de concentración, y define en términos relativos, cuantas veces se utiliza una unidad de agua en el circuito. O sea, a mayores ciclos de concentración, mayor concentración de componentes en el agua y mayor vez es utilizada el agua con respecto a si se utilizara como un sistema de un paso (el agua ingresa al sistema, enfría el proceso y es eliminada)

Los ciclos de concentración se pueden definir mediante flujos o bien análisis químicos de una especie que no sufra cambios químicos o físicos en el circuito. En términos de flujo, podemos definir el parámetro como sigue:

$$\text{Ciclos de concentracion} = \frac{\text{Flujo de Reposicion}}{\text{Flujo de purga}}$$

Ahora bien, si consideramos el balance general en estado estacionario de agua de un circuito de enfriamiento de recirculación abierta, tenemos que:

$$\text{Flujo de reposición} = \text{Flujo de evaporación} + \text{Flujo de purga}$$

Si reemplazamos ambas ecuaciones, se tiene una relación entre la evaporación, la purga y los ciclos de concentración:

$$\text{Flujo de evaporación} = \text{Flujo de purga} * (\text{ciclos de concentración} - 1)$$

Esta expresión nos sirve para observar que, a una evaporación constante, los aumentos de ciclos de concentración hacen que los flujos de purga disminuyan, por lo tanto, el flujo de reposición también disminuye, haciendo del uso del recurso más eficiente. El mínimo de flujo de reposición que podemos utilizar, está determinado por el flujo de evaporación, entonces fluido dinámicamente tenemos un límite mínimo para el uso del recurso, un mínimo caudal necesario, que está definido por la evaporación que se genera en la torre de refrigeración por el proceso de enfriamiento.

Se puede observar el fenómeno de aumento de ciclos de concentración y el cambio en los flujos de agua de reposición y purga en la figura 7.5.

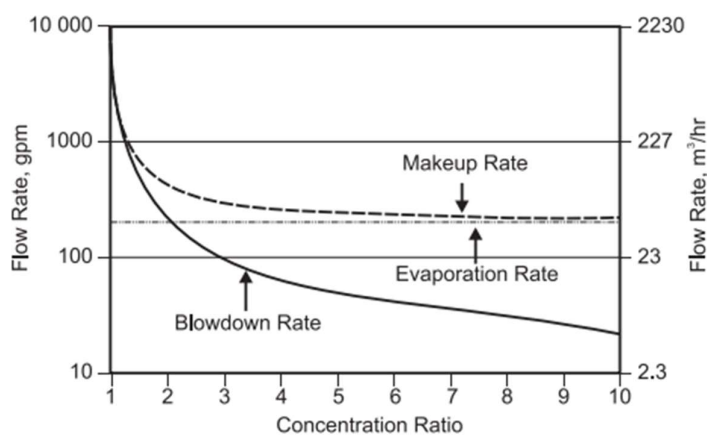


Figura 7.5 Evolución de caudales de reposición y purga con el aumento de ciclos de concentración
fuente: *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*

Además, del agua de reposición y agua de purga, los circuitos de enfriamiento de recirculación abierta, tienen otras pérdidas de agua, la denominada arrastre, que se genera por la acción del flujo de aire que se pone en contacto con el agua. Por lo general, viene determinada por el fabricante de la torre de enfriamiento, pero si no es así, se puede estimar como el 0,01% del agua que está recirculando en el circuito.

Teniendo en cuenta el primer límite al uso del agua, la evaporación, al hacer cero la purga, la realidad de esto no se puede llevar a cabo, ya que el agua contiene sales disueltas que se concentrarían hasta superar sus límites de solubilidad, es por esto, que la química del agua juega un rol fundamental en la determinación de cuantos ciclos de concentración se puede obtener en un circuito en particular.

Anexo 7.3. Química del circuito de agua de refrigeración

Se define como solubilidad de un compuesto como la máxima cantidad de un soluto que se puede disolver en una cantidad de disolvente dada a una temperatura determinada (Chang, Química, Séptima Edición, 2002) Por lo tanto, en el agua existen tantas solubilidades como compuestos disueltos, además hay que tener en consideración que el proceso de refrigeración conlleva cambios de temperatura, y es en estas condiciones, donde se comienza a vislumbrar el segundo límite al uso del recurso como medio de refrigeración, la solubilidad de los compuestos y la precipitación de estos como incrustaciones en el circuito.

Las incrustaciones, son precipitados (cambios de fase disuelta a una fase sólida) de compuestos que tienen características aislantes térmicas, entre otras, que dificultan o hacen menos eficiente el proceso de refrigeración, por lo tanto, es un proceso que se debe evitar. Para esto existen múltiples estrategias, desde el control de la concentración en el agua de refrigeración, mediante el control de la purga del circuito de agua de refrigeración, pasando por la inyección de productos químicos que modifiquen el proceso de precipitación, o bien modifiquen estructuralmente el precipitado a nivel molecular para hacerlo menos incrustante, hasta una mezcla de las estrategias antes mencionadas.

El proceso de cambio de fase disuelta a fase sólida, la describe el equilibrio químico de cada compuesto, pero es muy complejo de determinar mediante modelos matemáticos, de hecho, la investigación de este proceso y la aplicación industrial de la predicción y control de incrustaciones es más bien empírico. No es el objetivo de este trabajo explicar el desarrollo de las herramientas de determinación de estos procesos, pero si se presentara uno de los parámetros que se utiliza ampliamente en la industria para predecir la ocurrencia o no de estos procesos.

La solubilidad de un compuesto químico está fuertemente influenciada por la temperatura, y por lo general, al aumentar temperatura hace que la mayoría de los compuestos sean más solubles, excepto compuestos minerales de calcio y magnesio, entre otros, que tienen un comportamiento inverso. Esto es, al aumentar la temperatura, su solubilidad disminuye (ver figura 7.6). Este fenómeno, perjudica el funcionamiento del circuito de agua de refrigeración, ya que la transferencia de calor, hace aumentar la temperatura del agua, y si los compuestos superan su solubilidad a esta temperatura, precipitarán. Uno de estos compuestos es el carbonato de calcio

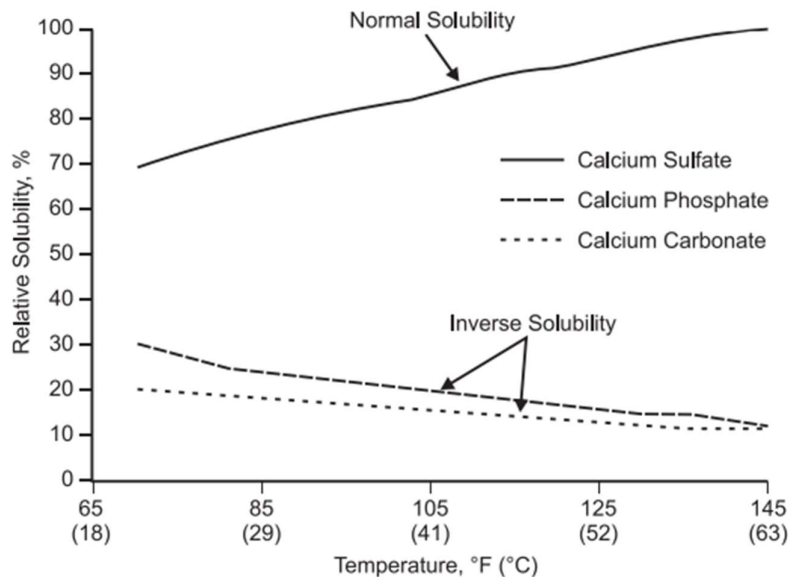


Figura 7.6 Solubilidad con respecto a cambios en la temperatura en sales de calcio, tomada de *The Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018*

El equilibrio del carbonato de calcio, ha sido ampliamente estudiado, siendo este un mineral que por lo general está presente en el agua, y considerando que tiene una solubilidad baja en términos relativos, su proceso de utiliza en la industria como referencia para determinar el potencial de incrustación de minerales en el agua a unas condiciones determinadas. Ya en la década de 1920, se definió un índice de saturación de *Langelier*, que determina el pH de equilibrio de un agua que contiene carbonato cálcico, mediante 4 parámetros, estos son: concentración de calcio, concentración de alcalinidad, la salinidad total mediante, por ejemplo, la conductividad eléctrica del agua y la temperatura del agua. Finalmente, el índice de *Langelier* (LSI) es la diferencia entre el pH real de la muestra de agua menos el pH de equilibrio (Manual técnico del agua, *Degrémont*, 1979). Entonces se puede interpretar que:

$$LSI = pH - pH_s$$

donde: si $LSI < 0$, el agua disolverá carbonato de calcio
 Si $LSI = 0$, el carbonato de calcio estará en equilibrio
 Si $LSI > 0$, el carbonato de calcio precipitará

Este simple parámetro, podrá ayudar a determinar mediante análisis químico del agua que se encuentra en el agua de recirculación, si las condiciones son incrustantes o no al carbonato de calcio, por ende, tenemos el segundo límite de uso mínimo del recurso en el circuito. Será necesario mantener una concentración tal, que permita que las sales de carbonato de calcio, por ejemplo, no precipiten durante el proceso de refrigeración.

En la realidad industrial, existen una serie de parámetros adicionales a tener en consideración, para determinar cuál será la purga necesaria que se debe mantener en el circuito, para evitar procesos de incrustaciones, pero la idea es presentar cual es el desarrollo básico y los parámetros a considerar que afectan al uso del recurso hídrico como consumo, que en definitiva es el foco del desarrollo de las alternativas que posteriormente se analizaran.

Anexo 7.4. Normativa

Una vez definido como enfriar los procesos industriales, que factores afectan el consumo del agua como medio de refrigeración, se presenta la siguiente pregunta, de donde obtener el recurso hídrico para hacer posible el proceso de enfriamiento en la industria, y es aquí donde la autoridad nacional interviene, gestionando el recurso hídrico mediante la normativa legal vigente.

Todo proyecto industrial en Chile, entre otras autorizaciones, debe pasar por una evaluación ambiental, toda vez que existan o pudieran existir, impactos sobre el medio ambiente. Esta evaluación la realiza el SEA (servicio de evaluación ambiental) entidad dependiente del Ministerio de Medio Ambiente, que mediante la herramienta SEIA (Sistema de evaluación de impacto ambiental) determina las condiciones en que el proyecto puede ser ejecutado, incluyendo la evaluación de impactos ambientales, medidas de mitigación, reparación o compensación, planes de prevención de contingencias y planes de emergencias, planes de seguimiento de las variables ambientales, entre otros. (sea.gob.cl)

Finalmente, y luego de cumplir con el protocolo de análisis llevado a cabo por la autoridad medioambiental, el proyecto recibe su RCA (resolución de calificación ambiental) donde entre otras cosas, se expone desde donde se obtiene el recurso hídrico, la normativa que aplica al uso de este y cuáles son las condiciones que deberán cumplirse para el correcto uso y disposición del recurso.

Dentro de las posibilidades que existen para optar al uso de recurso hídrico, podemos citar algunos medios que la autoridad contempla como fuentes de agua para uso industrial. Una posibilidad es solicitar una DAA (derecho de aprovechamiento de agua) a la dirección general de agua, DGA, ya sea de agua superficial, o bien agua subterránea. “Este derecho de aprovechamiento es un derecho real que recae sobre las aguas, que consiste en el uso y goce temporal de ellas” (Ley N°21435, Reforma El Código de Aguas, 2022) Este DAA queda definido por un tiempo de 30 años, prorrogable. Queda además definido el caudal a utilizar por parte del titular del derecho, entre otros aspectos. Otra opción es firmar un contrato de abastecimiento de agua, con un proveedor de servicio sanitario

(sanitaria), que provea el recurso proveniente de la producción de agua potable. Una diferencia importante, radica que el costo de obtener agua a través de un DAA está directamente relacionado al costo de extraer el agua desde la fuente, sea superficial o bien subterránea. Mientras que, en el caso de obtener agua potable, desde el contrato con la sanitaria, el costo es el precio que acuerdan ambas partes en el contrato de abastecimiento, siendo este último más oneroso que el anterior, debido al proceso de potabilización y márgenes del negocio de las sanitarias, regulado por normativa nacional.

Según la DGA, la disponibilidad hídrica superficial en la región metropolitana es nula (Atlas del agua, Chile 2016) ver figura 4.8 por lo tanto, por ejemplo, no es posible extraer agua del Río Maipo para utilizarla procesos de refrigeración.

| | | | | Disponibilidad hídrica (m³/s) | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|----------------|-------------------|-------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-----|------|---|
| Macrozona | Región | Cuenca | Tipo de Ejercicio | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | | | |
| Centro | V | Rio Aconcagua | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | | | Eventual | 5,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4,6 | 28,9 | |
| | | Rio Petorca | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | Eventual | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,3 | 2,5 | - | - |
| | | Rio La Ligua | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | Eventual | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,6 | 2,1 | - | 1,2 | 1,5 | - | - |
| | RM | Rio Maipo | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | Eventual | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | VI | Rio Rapel | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | Eventual | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | Estero Nilahue | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | Eventual | - | - | - | - | - | - | 9,2 | 75,5 | 49,2 | 52,7 | 25,5 | 3,2 | 0,6 | - | - | | |
| | VII | Rio Mataquito | Permanente | - | - | 5,4 | 12,2 | 18,4 | 20,5 | 37,9 | 35,0 | 298 | 36,2 | - | 16,7 | - | - | |
| | | | Eventual | 209,8 | 1195 | 65,4 | 60,8 | 162 | 260,9 | 156,1 | 151,5 | 98,1 | 81,2 | 98,9 | 244,8 | - | - | |
| | | Rio Maule | Permanente | - | - | - | - | - | - | - | 23 | 20 | 55 | - | - | - | - | |
| | | | Eventual | 109 | - | - | 95 | 666 | 2.327 | 1.324 | 1.268 | 671 | 393 | 300 | 238 | - | - | |

Figura 7.7 Disponibilidad hídrica de agua superficial (l/s), tomada de Atlas de agua Chile 2016.

Por lo tanto, queda solamente disponible la extracción de agua desde fuentes subterráneas, para los titulares de DAA, quienes, si poseen el derecho de aprovechamiento, podrán hacer uso de ese derecho para los fines definidos en el estudio de impacto ambiental, en los caudales y condiciones comprometidas y explicitadas en la RCA correspondiente.

Ahora bien, para el caso de estudio expuesto en este trabajo, las fuentes de agua que utilizan los casos a analizar son: DAA para la extracción de subterránea y la adquisición de agua potable por medio de contrato de abastecimiento con una empresa sanitaria que la produce.

Teniendo el agua disponible en las cantidades necesarias, la autoridad medioambiental de Chile, ha generado normativas con respecto a la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos líquidos, ya que como observamos en el caso particular de los procesos de refrigeración industrial, se requiere eliminar agua de los circuitos y esta agua deberá ser dispuesta de la manera que la normativa vigente lo permita y esté debidamente expresado en el estudio de impacto ambiental.

7.4.1. Decreto Supremo N°90 norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales

Tal como lo expresa el Decreto Supremo N°90 en su primer artículo, el objetivo de esta norma de protección ambiental es prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores. Para esto se han establecido límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos.

El establecimiento de estos límites máximos se ha pensado en el tipo de cuerpo de agua receptor y se han dividido en 5 categorías de concentraciones máximas de contaminantes listados en 5 tablas, las cuales se enumeran a continuación:

1. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales
2. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor
3. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres
4. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral
5. Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral.

Cada tabla contiene un límite máximo para el contaminante y las condiciones a las cuales aplica la tabla, entendiendo que existen dos tablas aplicables para descargas en aguas fluviales, una tabla para descarga en cuerpos de agua lacustre y dos para cuerpos de agua marina. El detalle de cada tabla se puede observar en el decreto antes mencionado, pero para nuestro caso en particular, que será expuesto en detalle más adelante, será aplicable la tabla N°1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales. Esto límites máximos se muestran continuación:

Tabla 7.1, Decreto Supremo N°90, Tabla N°1

| Contaminantes | Unidad | Expresión | Limite Máximo Permitido |
|---|------------|-------------|-------------------------------|
| Aceites y Grasas | mg/L | A y G | 20 |
| Aluminio | mg/L | Al | 5 |
| Arsénico | mg/L | As | 0,5 |
| Boro | mg/L | B | 0,75 |
| Cadmio | mg/L | Cd | 0,01 |
| Cianuro | mg/L | CN- | 0,20 |
| Cloruros | mg/L | Cl- | 400 |
| Cobre Total | mg/L | Cu | 1 |
| Coliformes Fecales o Termotolerantes | NMP/100 ml | Coli/100 ml | 1000 |
| Indice de Fenol | mg/L | Fenoles | 0,5 |
| Cromo Hexavalente | mg/L | Cr6+ | 0,05 |
| DBO5 | mg O2/L | DBO5 | 35 * |
| Fósforo | mg/L | P | 10 |
| Fluoruro | mg/L | F- | 1,5 |
| Hidrocarburos Fijos | mg/L | HF | 10 |
| Hierro Disuelto | mg/L | Fe | 5 |
| Manganeso | mg/L | Mn | 0,3 |
| Mercurio | mg/ L | Hg | 0,001 |
| Molibdeno | mg/L | Mo | 1 |
| Níquel | mg/L | Ni | 0,2 |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | mg/L | NKT | 50 |
| Pentaclorofenol | mg/L | C6OHC15 | 0,009 |
| PH | Unidad | pH | 6,0 -8,5 |
| Plomo | mg/L | Pb | 0,05 |
| Poder Espumógeno | mm | PE | 7 |
| Selenio | mg/L | Se | 0,01 |
| Sólidos Suspendidos | | | |
| Totales | mg/L | SS | 80 * |
| Sulfatos | mg/L | SO42- | 1000 |
| Sulfuros | mg/L | S2- | 1 |
| Temperatura | C° | T° | 35 |
| Tetracloroetano | mg/L | C2Cl4 | 0,04 |
| Tolueno | mg/L | C6H5CH3 | 0,7 |
| Triclorometano | mg/L | CHCl3 | 0,2 |
| Xileno | mg/L | C6H4C2H6 | 0,5 |
| Zinc | mg/L | Zn | 3 |

Dado que el proyecto que recibe la autorización mediante la resolución de calificación ambiental RCA, es titular de un DAA, y queda expresado en la resolución la utilización de esta fuente de agua como parte del proceso productivo,

es aplicable el decreto N°90 y queda así expresado, tal como la frecuencia de inspección por parte de la autoridad el cumplimiento de esta norma.

7.4.2. Decreto Supremo N°609 norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos Industriales líquidos a sistemas de alcantarillado

Asimismo, como el decreto N°90 regula la emisión de contaminante asociados a descargas en cuerpos de agua superficiales y marinos, el decreto N°609 tiene el mismo objetivo de regular la emisión de contaminantes asociados a descargas de aguas industriales al sistema de alcantarillado. Esta norma, define los tipos de contaminantes, carga de contaminante media diaria y agrupa los niveles máximos de contaminante en cuatro categorías, las dos primeras, están relacionadas al tamaño del servicio sanitario que trata las aguas servidas (servicio sanitario que trata una población de menos de 100.000 Habitantes y servicio sanitario que trata una población de más de 100.000 Habitantes) la tercera y cuarta categoría están definidas para efluentes que cuentan, o no, con planta de tratamiento de aguas servidas antes de ser descargadas al sistema de alcantarillado. La denominación de cada tabla se lista a continuación:

1. Caracterización de aguas servidas domesticas correspondientes a 100 habitantes
2. Caracterización de aguas servidas domesticas correspondientes a 200 habitantes
3. Límites máximos permitidos para la descarga de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas
4. Límites máximos permitidos para la descarga de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas

Para el caso de análisis de este trabajo, donde la captación de agua para refrigeración se realiza desde el prestador de servicio sanitario, con calidad de agua

potable, la tabla que aplica a la descarga del efluente es la tabla N°4, Límites máximos permitidos para la descarga de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas. Ya que, según El D.S. N.º 3.592 del 18 de agosto de 2000 modificó el D.S. N.º 609. Su numeral 5.2.3.2 establece que, en el caso que la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas entre en operación con posterioridad al 20 agosto de 2000, los establecimientos industriales que descargan a las redes de alcantarillado correspondientes deberán dar cumplimiento a las exigencias establecidas en la Tabla N.º 4 de la normativa. Los límites máximos de contaminantes se muestran a continuación:

Tabla 7.2, Límites máximos permitidos para la descarga de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas. Fuente: D.S. 609 MOP

| Parámetros | Unidad | Expresión | Límite máximo permitido |
|-----------------------------|----------|------------------------------|-------------------------|
| Aceites y grasas | mg/L | A y G | 150 |
| Aluminio | mg/L | Al | 10 (1) |
| Arsénico | mg/L | As | 0,5 |
| Boro | mg/L | B | 4 (1) |
| Cadmio | mg/L | Cd | 0,5 |
| Cianuro | mg/L | CN- | 1 |
| Cobre | mg/L | Cu | 3 |
| Cromo hexavalente | mg/L | Cr+6 | 0,5 |
| Cromo total | mg/L | Cr | 10 |
| Hidrocarburos totales | mg/L | HC | 20 |
| Manganeso | mg/L | Mn | 4 |
| Mercurio | mg/L | Hg | 0,02 |
| Níquel | mg/L | Ni | 4 |
| pH | Unidad | pH | 5,5-9,0 |
| Plomo | mg/L | Pb | 1 |
| Poder espumógeno | mm | PE | 7 |
| Sólidos | | | |
| sedimentables | ml/L 1 h | S.D. | 20 |
| Sulfatos | mg/L | SO ₄ -2 | 1.000 (2) |
| Sulfuros | mg/L | S-2 | 5 |
| Temperatura | °C | T° | 35 |
| Zinc | mg/L | Zn | 5 |
| DBO5 | mg/L | DBO5 | 300 |
| Fósforo | mg/L | P | 10-15 (3) |
| Nitrógeno amoniacal | mg/L | NH ₄ ⁺ | 80 |
| Sólidos suspendidos totales | mg/L | S.S. | 300 |

(1) Si la concentración media del contaminante presente en la captación de agua del establecimiento industrial (distribuida por el prestador de servicio sanitario o de fuente propia) fuere mayor a la indicada en la tabla, el límite máximo del contaminante presente en la descarga será igual a la concentración presente en la captación.

(2) Se aceptarán concentraciones entre 1.000 y 1.500 mg/L si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) pH = 8 -9;
- b) temperatura del residuo industrial líquido (°C) ? temperatura de las aguas receptoras.

(3) El elemento Fósforo tendrá límite máximo permitido de 15 mg/L. En aquellos riles descargados en sistemas de alcantarillado cuya disposición final se efectúa a un afluente de un lago, a un lago, laguna o

embalse, sean estas últimas naturales o artificiales, este parámetro tendrá límite máximo permitido de 10 mg/L.