



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



Propuesta de mejoramiento y evaluación de desempeño ambiental de un proceso CIP del área de recepción de leche en una planta láctea en la Región de los Ríos.

Por

Maximiliano Alejandro Donoso Reyes

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesor guía

Claudio Zaror

Profesional supervisor

Alexis Lazo

Enero, 2024

Concepción (Chile)

© 2024, Maximiliano Alejandro Donoso Reyes

© 2024, Maximiliano Alejandro Donoso Reyes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

Los procesos de limpieza en el lugar, comúnmente conocidos como CIP (cleaning in place), son sistemas que se utilizan para limpiar líneas y equipos de procesos sin tener que desmontarlos. Son ampliamente utilizados en las industrias de alimentos y bebidas, las cuales requieren un alto nivel de higiene. Estos procesos conllevan un alto consumo de agua, energía e insumos químicos, por lo que es importante identificar opciones de optimización para reducir los potenciales impactos ambientales asociados al uso de recursos naturales y de sustancias peligrosas. En este contexto, el objetivo de este trabajo es determinar el desempeño ambiental asociado al sistema CIP antes y después de la puesta en marcha de una propuesta de mejoramiento del programa de lavado que se encarga de la limpieza de silos, estanques y camiones lecheros de una planta láctea en la Región de los Ríos. La propuesta fue desarrollada en base a un trabajo de auditoría realizado sobre el sistema CIP, donde se lograron identificar medidas de ahorro en consumos de vapor, agua y químicos, reduciendo a su vez los tiempos de lavado de los objetivos. Dentro de las propuestas se encuentran medidas de recuperación de solución alcalina, disminución de tiempos extra en los lavados, ajustes de programación y eliminación del uso de vapor en los enjuagues. Estas oportunidades de ahorro se cuantificaron obteniendo una proyección de una reducción anual de 10.143 m³ de agua, 1.308 toneladas de vapor, 11.097 kWh de consumo eléctrico y 17.425 kg de NaOH. Estos resultados entregaron que las medidas propuestas permitirían reducciones de un 49%, 33%, 11% y 43%, en los consumos de hidróxido de sodio, agua, electricidad y vapor. En base a los datos obtenidos, se realizó una evaluación de desempeño ambiental del CIP considerando los consumos previos a la optimización y posterior a la implementación de las oportunidades de mejora propuestas. Esta evaluación, que se hizo según la norma ISO 14.040 con un enfoque de ciclo de vida, demostró que la optimización de consumos en el CIP permite reducciones significativas en todas las categorías de impacto intermedias. La disminución de la concentración de soda desde un 1% a un 0,5% llevó a bajar en un 50% los kg P eq ligados a la eutrofización de agua dulce, la cual, en ambos escenarios estudiados fue la categoría de impacto normalizada predominante con un 98% sobre las demás, afectada principalmente por el consumo eléctrico. Por otro lado, en las categorías de impacto final, el daño al medio ambiente fue el indicador de mayor implicancia. Los resultados encontrados evidencian que reducir los consumos del CIP afecta de manera directa sobre los impactos ambientales.

Abstract

Clean in place processes commonly known as CIP, are systems that are used to clean process lines and equipment without having to disassemble them. They are widely used in the food and beverage industries, which require a high level of hygiene. These processes involve a high consumption of water, energy, and chemicals, therefore, is important identify optimization options to reduce potential environmental impacts associated with the use of natural resources and hazardous substances. In this context, the objective of this work is to determine the environmental performance associated with the CIP system before and after the implementation of a proposal to improve the washing program. The system studied consists of a CIP that is responsible for the cleaning of silos, tanks, and dairy trucks, in a dairy plant in “Región de los Ríos”. The proposal was developed based on an audit carried out on the CIP system, where it was possible to identify savings measures in steam, water, and chemical consumption, while reducing the washing times of the objectives. Among the proposals are measures for the recovery of alkaline solution, reduction of extra time to washing, programming adjustments and elimination of the use of steam in rinses. These savings opportunities were quantified by obtaining a projection of an annual reduction of 10.143 m³ of water, 1.308 tons of steam, 11.097 kWh of electricity consumption and 17.425 kg of NaOH. These results showed that the proposed measures would allow reductions of 49%, 33%, 11% and 43% in the consumption of sodium hydroxide, water, electricity, and steam. Based on the data obtained, an environmental performance evaluation of the CIP was carried out, considering the consumption before to the optimization and after the implementation of the proposed improvement opportunities. This assessment, which was carried out according to the ISO 14.040 standard with a life cycle approach, demonstrated that the optimization of consumption in the CIP allows significant reductions in all intermediate impact categories. The decrease in the concentration of soda from 1% to 0.5% led to a 50% decrease in the kg P eq linked to the eutrophication of fresh water, which, in both scenarios studied, it was the predominant normalized impact category with 98% over the other categories, mainly affected by electricity consumption. On the other hand, in the final impact categories, the category of damage to the environment predominated over the others. The results show that reducing CIP consumption directly affects environmental incapacitations.

Agradecimientos

Agradecer primero a mis padres, por darme la posibilidad de formarme como profesional y entregarme su cariño y apoyo siempre, en cada decisión que he tomado. También darle las gracias por otorgarme todas las facilidades para poder viajar y establecerme en otra ciudad, lo cual me permitió crecer y desarrollarme como persona, preocupándose siempre por mí en todo momento. Por supuesto también agradecer a mi hermana, por aconsejarme siempre y preocuparse siempre por mi casi como una segunda mamá. Todo lo que he logrado hasta ahora en mi vida es gracias a ustedes y su incondicional apoyo.

Agradecer a mi polola Valentina, la cual, me ha acompañado durante más de 8 años, siempre apoyándome y presente entregándome todo su amor y cariño, haciendo que la distancia no sea un impedimento para sentir que siempre estaba conmigo, ya que, sin ella todo este camino no hubiera sido el mismo.

Por otro lado, también agradecer al profesor Claudio Zaror por su asesoría durante todo este año para realizar esta memoria de título, entregándome también consejos y vivencias que sin duda me ayudaran para mi desarrollo profesional. Complementar también mis agradecimientos con todo el departamento de ingeniería química.

También agradecer a mi amigo Mauricio Caroca, compañero de mil batallas a lo largo de toda la carrera y también dentro de la cancha de fútbol.

Agradecer a la empresa Ecolab, específicamente a Alexis Lazo, Fabián Haeger y Carlos Aros, que colaboraron en la realización de esta memoria, brindándome asesoría, apoyo y dejándome un gran aprendizaje para también en mi desarrollo como profesional.

Por último y no menos importante, agradecer al equipo Ingeniería 85, el cual me acompañó desde que llegué a la universidad en 2018 y me seguirá acompañando luego de finalizar mi etapa universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	10
1. Procesos de limpieza in-situ (CIP)	11
1.1 Parámetros de limpieza.....	11
1.2 Aspectos ambientales de un proceso CIP	13
1.3 Evaluación ambiental de ciclo de vida en proceso CIP	13
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. Materiales y métodos.....	16
3.1 Asignación de límites del sistema	16
3.2 Recopilación de datos.....	17
3.3 Obtención de datos para inventario del ciclo de vida	19
3.4 Selección del modelo de evaluación de impactos ambientales.....	20
4. Resultados y discusión.....	22
4.1 Sistema CIP área de recepción de leche.	22
4.2 Medidas de mejora en el CIP	26
4.3 Objetivo y alcance del estudio	33
4.4 Unidad funcional	33
4.5 Límites del sistema	33
4.6 Análisis de inventario.....	34
4.7 Evaluación ambiental de ciclo de vida.....	35
5. Discusión de resultados.....	42
6. Conclusiones	44
7. Referencias.....	45
8. Anexos	48
Anexo A: Base de cálculo inventario de ciclo de vida	48
Anexo B: Determinación de consumos CIP RDL	49
Anexo C: Impactos intermedios y normalizados SEN	58
Anexo D: Impactos intermedios y normalizados hidróxido de sodio	60
Anexo E: Impactos intermedios y normalizados Boiler caldera de biomasa.....	62
Anexo F: Impactos CIP RDL 1.	64

Anexo G: Impactos CIP RDL 2..... 66
Anexo H: Spray balls 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.3.1. Procesos de Ecoinvent para la producción de insumos (Elaboración propia). .	20
Tabla 3.3.2. Fuente de generación eléctrica y contribución a la matriz energética año 2022.	20
Tabla 3.4.1: Categorías de impacto ambiental utilizadas en el estudio (Elaboración propia)	21
Tabla 3.4.2. Factores de caracterización para la obtención de los impactos finales del modelo ReCiPe. (Elaboración propia).....	21
Tabla 4.2.1: Oportunidades de ahorro cuantificadas para el CIP de recepción de leche. (Elaboración propia)	31
Tabla 4.2.2: Consumos mensuales por escenario del CIP de recepción de leche (Elaboración propia).	32
Tabla 4.6.1: Consumos recepción de leche para escenario actual y aplican propuestas de ahorro, en base a los m ³ de leche procesada. (Elaboración propia).....	34
Tabla 4.7.1. Impactos intermedios asociados a los consumos actuales del CIP de recepción de leche. (Elaboración propia).....	35
Tabla A.1. Base de cálculo para lavados soda (diarios) y lavados soda/ácido (semanales). (Elaboración propia).	48
Tabla A.2. Flujos utilizados por objetivo. (Elaboración propia).....	48
Tabla B.1. Consumo de agua enjuagues finales. (Elaboración propia).....	49
Tabla B.2. Consumo de agua enjuagues intermedios. (Elaboración propia).	49
Tabla B.3. Tiempo anual ocupado en lavados. (Elaboración propia).....	50
Tabla B.4. Consumo energético del CIP de recepción de leche. (Elaboración propia).	50
Tabla B.5. Consumo de vapor en recirculación de Soda. (Elaboración propia).	51
Tabla B.6. Consumo de NaOH al 1% en el CIP RDL. (Elaboración propia).....	51
Tabla B.7. Recuperación de solución de 20 a 5 mS por todos los objetivos. (Elaboración propia).	52
Tabla B.8. Recuperación de solución por generación de espuma. (Elaboración propia).....	52
Tabla B.9. Ajuste de programación línea A, reducción del tiempo de enjuague intermedio. (Elaboración propia).....	52
Tabla B.10. Consumo extra de camión por efecto piscina. (Elaboración propia).	53
Tabla B.11. Consumo extra de spray balls estáticas en comparación a orbitales. (Elaboración propia).	53
Tabla B.12. Ahorro de vapor al recuperar condensado. (Elaboración propia).....	53
Tabla B.13. Ahorro de vapor en pre-enjuagues. (Elaboración propia).....	54
Tabla B.14. Ahorro de vapor en enjuagues intermedios (Elaboración propia).	54

Tabla B.15. Ahorro de vapor en recirculación soda (Elaboración propia).	55
Tabla B.16. Consumo proyectado de NaOH al 0,5% en el CIP RDL. (Elaboración propia).55	
Tabla B.17. Reducción de consumo proyectado por menor conductividad de soda. (Elaboración propia).	56
Tabla B.18. Ahorro operacional al introducir inyección automática de soda. (Elaboración propia).	57
Tabla C.1: Impactos intermedios generación eléctrica en Chile. (Elaboración propia).	58
Tabla C.2: Impactos normalizados generación eléctrica en Chile. (Elaboración propia).	59
Tabla D.1: Impactos intermedios producción de hidróxido de sodio al 50%. (Elaboración propia).	60
Tabla D.2. Impactos normalizados producción de hidróxido de sodio al 50%. (Elaboración propia).	61
Tabla E.1. Impactos intermedios generación de vapor en caldera de biomasa. (Elaboración propia).	62
Tabla E.2. Impactos normalizados generación de vapor en caldera de biomasa. (Elaboración propia).	63
Tabla F.1. Contribución por insumo a las categorías de impacto intermedios en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).	64
Tabla F.2. Contribución por insumo a las categorías de impactos final en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).	64
Tabla F.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).	65
Tabla F.4. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).	65
Tabla G.1. Contribución por insumo a las categorías de impactos intermedios en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).	66
Tabla G.2. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).	66
Tabla G.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).	67
Tabla G.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).	67
Tabla H.1: Tipos de Spray ball, modelos e información de (Tetra Pak, 2023). (Elaboración propia)	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.1. Diagrama del sistema CIP en el área de recepción de leche. (Elaboración propia).	22
Figura 4.2.1: Mediciones de sonda de conductividad de solución que se quiere recuperar. (Elaboración propia)	27
Figura 4.5.1. Límites del sistema CIP recepción de leche. (Elaboración propia)	33
Figura 4.7.1. Impactos intermedios CIP RDL1 Y CIP RDL2. (Elaboración propia).....	36
Figura 4.7.2. Impactos intermedios asociados a los consumos actuales del CIP RDL 1. (Elaboración propia).	37
Figura 4.7.3. Impactos intermedios asociados a los consumos proyectados del CIP RDL 2. (Elaboración propia).....	37
Figura 4.7.4. Impactos finales asociados a los consumos actuales del CIP RDL 1. (Elaboración propia).	38
Figura 4.7.5. Impactos finales asociados a los consumos actuales del CIP RDL 2. (Elaboración propia).	38
Figura 4.7.6. Impactos finales de daño a la salud (DALY) y daño al medioambiente (especies. año) CIP RDL 1 Y CIP RDL 2. (Elaboración propia).....	39
Figura 4.7.7 Impactos finales de recursos naturales (USD2013) CIP RDL 1 Y CIP RDL 2. (Elaboración propia).....	39
Figura 4.7.8. Impactos normalizados asociados a los consumos actuales del CIP RDL 1. (Elaboración propia).	39
.....	40
Figura 4.7.9. Impactos normalizados asociados a los consumos proyectados del CIP RDL 2. (Elaboración propia).....	40
Figura 4.7.10. Impactos finales normalizados CIP RDL 1	41
Figura 4.7.11. Impactos finales normalizados CIP RDL 2	41

1. Procesos de limpieza in-situ (CIP)

El procesamiento de leche conlleva diversos procesos en donde se generan residuos en líneas y equipos, los cuáles pueden ocasionar la generación de atascos, pérdidas de presión, ensuciamiento y contaminación microbiológica (Brasileiro et al, 2023). La presencia de estos residuos alimentarios genera una preocupación, debido a que una potencial contaminación alimentaria puede ser perjudicial para la salud de las personas y afectar la calidad del producto final, además de generar otros problemas como corrosión y la formación de biopelículas (Kabwanga et al., 2018). Es por ello, que en la industria de alimentos y bebidas se realizan los procesos de limpieza in-situ o en inglés *clean in place* (CIP), los cuales son sistemas que se utilizan para limpiar la superficie interior de recipientes, estanques, filtros, evaporadores, intercambiadores de calor, líneas y otros equipos asociados sin tener que desmontarlos, permitiendo un ahorro de tiempo productivo (Thomas y Sathian, 2014). Según Wang et al. (2018), es recomendable que los lavados se realicen periódicamente cada 24 horas para garantizar la seguridad alimentaria de los productos finales.

Estos procesos son ampliamente utilizados en las industrias que requieren un alto nivel de higiene, como lo son aquellas que producen lácteos, bebidas, cerveza, productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos procesados. Su estructura corresponde a un sistema hidráulico donde se realiza un lavado a través de máquinas, circuitos y tuberías cerradas, rociando y haciendo circular líquidos de limpieza a través de las superficies de los equipos en un flujo turbulento (Pant et al., 2023; Thomas y Sathian, 2014).

Los CIP se diferencian dependiendo de los sistemas que se van a limpiar; por ejemplo, los estanques que necesitan ser limpiados en el lugar, requieren de la utilización de *spray balls* de limpieza estáticas, rotatorias u orbitales, colocadas en diferentes posiciones, trabajando en un amplio rango de presiones y caudales (Bénézech y Lalande, 2002).

1.1 Parámetros de limpieza

El lavado consiste en circular agua y agentes químicos a determinadas concentraciones y temperaturas, con un flujo que permita una correcta limpieza de equipos y líneas de proceso. En lavados alcalinos, las concentraciones van desde un 0,15% a un 5% (Pant et al., 2023; Thomas y Sathian, 2014). La efectividad de un proceso CIP depende de diversos factores como la naturaleza, el tiempo, la superficie y antigüedad del sistema a limpiar (Bremer et al., 2006). Los parámetros de

limpieza dependen de cada circuito específico, los cuales son validados y fijados para cada CIP. Es por ello que identificar la mejor manera de limpiar un circuito, línea o equipo de proceso dentro de una planta, es un desafío constante dentro de la industria. Los parámetros de limpieza, como las concentraciones, temperatura, flujos y el tiempo de lavado solo pueden ser validados para un CIP específico de forma empírica y en ocasiones no puede optimizarse en el mismo lugar por el riesgo a comprometer la inocuidad de la línea (Goode et al., 2013). Los factores que inciden sobre la realización de una limpieza en el lugar son descritos por el “*Círculo de Sinner*”, los cuales son acción mecánica (flujo), temperatura, acción química y los tiempos de lavado (Goode et al., 2013).

Acción mecánica: La acción mecánica varía con las condiciones de presión y flujo, asociado a las potencias de las bombas, el chorro de limpieza y la geometría de la instalación a limpiar. En los estanques, existen limpiezas que son a alta presión (Bénézech y Lalande ,2002), la cual se realiza por medio de finos chorros que salen de una *spray ball*, las cuales pueden ser del tipo estática, rotatoria u orbital (Tetra Pak, 2023).

Acción química: La acción química depende directamente del residuo, ya que, en base a éste se determina la sustancia química idónea para removerlo. Según Bremer et al. (2006), el rol de la solución alcalina consiste en remover proteínas y carbohidratos; por otro lado, la solución ácida tiene como objetivo remover minerales y trazas del detergente alcalino de la superficie de los equipos.

Tiempos de lavado: Este indicador corresponde al tiempo que se demora la solución en realizar una etapa completa del lavado efectivo. Este es el parámetro más importante debido a que la operación de un sistema CIP significa que la línea y la producción se detengan durante todo el ciclo de limpieza (Gallot-Lavallee et al., 1984). Por lo tanto, la reducción de los tiempos de lavado se refleja directamente en los costos del proceso y los consumos de agua y energía requeridos (Piepiórka-Stepuk et al., 2021).

Temperatura: Corresponde a la temperatura a la cual circulan las soluciones por el sistema, calentadas por medio de un intercambiador de calor. De manera general, un incremento en la temperatura del agua significa un aumento en la efectividad del lavado (Fan et al.,2015). El rango de temperaturas normalmente usadas en un CIP que limpia tanques de almacenamiento de leche, como el caso de este estudio, va entre los 50 y 70 °C para la recirculación de detergentes y, por otro lado, para los pre-enjuagues no se recomienda una temperatura superior a los 40 °C, debido a que esto

podría ocasionar cambios químicos que impidan un actuar eficiente del agente químico que se introduce posterior a este paso (Bénézech y Lalande, 2002; Lelieveld et al., 2005).

1.2 Aspectos ambientales de un proceso CIP

Los sistemas CIP requieren de un alto consumo de agua, energía e insumos químicos, lo cual genera también grandes cantidades de efluentes que pueden ser dañinos para el medioambiente y conllevan un gasto económico adicional para ser tratados (Lyndgaard et al., 2014). Ejemplo de esto, es la industria láctea, en la cual se necesitan alrededor de 5.000 litros de agua para producir un kilogramo de queso, siendo uno de los principales contribuyentes el agua utilizada en los procesos de limpieza (Finnegan et al., 2018). Es por ello que la operación de estos sistemas, tienen un impacto directo en el desempeño ambiental y en los costos de producción, por lo que existe una permanente preocupación por optimizar los procesos CIP y reducir el consumo de recursos naturales, promoviendo la sustentabilidad de la industria (Goode et al., 2013; Tsai et al., 2021, Pant et al., 2023).

La elección del método de limpieza en el lugar y los parámetros asociados influye sobre los impactos medioambientales (Eide et al., 2003). Es importante considerar los potenciales impactos que pueden ocurrir fuera del sistema CIP, ya que el uso intensivo de electricidad y agentes químicos puede ser responsable de impactos en la etapa de generación de estos insumos. Por tal motivo, se debe utilizar un enfoque de ciclo de vida para identificar y evaluar potenciales impactos ambientales asociados a un sistema CIP.

1.3 Evaluación ambiental de ciclo de vida en proceso CIP

La evaluación de ciclo de vida (ECV) o en sus siglas en inglés (LCA) life cycle assesment, es un método cuantitativo ampliamente reconocido para identificar aspectos ambientales y evaluar los impactos asociados a un proceso determinado (Tsai et al., 2021). Según Palabiyik et al. (2015), los procesos CIP requieren de grandes cantidades de agua, insumos químicos y un alto consumo energético ligado al calentamiento, bombeo y operación del sistema durante el lavado, donde es clave la optimización de los parámetros para mejorar la efectividad del proceso y optimizar los consumos en cada etapa del programa de lavado.

En este contexto, en distintas evaluaciones de ciclo de vida realizadas a procesos CIP, se pueden observar distintos escenarios. Por ejemplo, el estudio realizado por Eide (2002) en una planta

lechera, arrojó que los procesos de limpieza son los mayores contribuyentes al potencial de eutrofización de una planta láctea, con un 80% del total de ésta. Por otro lado, según el mismo estudio, los procesos de limpieza son responsables en un 30% del total de energía consumida de la planta sometida a la evaluación de ciclo de vida. Otro ejemplo, expuesto por Pazouki et al. (2021), demuestra que los procesos CIP llevados a cabo sobre un sistema de membranas de filtración, generaron un aporte mayor sobre la toxicidad humana e impactos en agua.

De lo expuesto anteriormente, se concluye que los sistemas CIP presentan particularidades específicas a cada proceso, por lo que las medidas de mejoramiento y sus potenciales impactos ambientales deben ser estudiados caso a caso.

El presente estudio focaliza en las operaciones de limpieza de silos, estanques y camiones lecheros de una planta láctea en la Región de los Ríos, con vistas a proponer mejoras en el sistema CIP y evaluar sus potenciales impactos ambientales.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Proponer medidas de mejora para reducir los consumos de agua, energía, tiempo e insumos químicos en la operación del proceso CIP del área de recepción de leche de una planta láctea en la Región de los Ríos y realizar una evaluación ambiental desde la perspectiva del ciclo de vida de las mejoras propuestas.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1** Cuantificar los consumos de agua, energía e insumos químicos asociados al sistema CIP del área de recepción de leche de la planta estudiada.
- 2.2.2** Proponer medidas de mejora para la operación del sistema CIP auditado.
- 2.2.3** Evaluar y comparar los impactos ambientales de ambos escenarios de operación del sistema CIP, utilizando un enfoque de ciclo de vida

3. Materiales y métodos

El enfoque metodológico para realizar el presente trabajo constó de tres grandes pasos con vistas a identificar oportunidades de ahorro, recopilar los datos y cuantificar los impactos ambientales asociados.

En primer lugar, se desarrollaron actividades de revisión bibliográfica en bases de datos como “EBSCO”, “Science direct” y “Wiley”, donde se utilizaron palabras claves como “Clean in place”, “Dairy industry” y “lyfe cycle assessment”, para obtener información acerca de los potenciales impactos que genera un proceso CIP de la industria láctea en el medioambiente.

Como segundo paso, se realizaron actividades en terreno para determinar oportunidades de mejora en el CIP de recepción de leche, donde se realizaron diversas actividades que se mencionan dentro de este mismo capítulo en el apartado 3.2.

En tercer lugar, la metodología empleada para la realización de la evaluación de ciclo de vida del proceso CIP de silos, estanques y camiones del área de recepción de leche, se hizo en base a los principios y lineamientos expuestos en la norma internacional ISO 14.040-2006 (ISO, 2006a). La definición de los objetivos, alcance y el inventario utilizado en el estudio, se hizo en base a la norma internacional ISO (2006b), definiendo los límites del sistema con respecto a la información que se logró recopilar en terreno del CIP.

Por último, se cuantificaron los impactos ambientales en base al inventario de Ecoinvent por medio del software SimaPro 9.1, utilizando las categorías de impacto intermedios y finales del modelo ReCiPe. Los resultados fueron comparados entre sí y con los estudios ECV de Eide (2002) y Pazouki et al. (2021).

3.1 Asignación de límites del sistema

Estos límites se definieron con la información recopilada en terreno, donde se realizó un análisis de los registros operacionales disponibles tanto de forma manual, como en el programa del computador que controla el CIP. Con estos datos, se pudo calcular los consumos de hidróxido de sodio, ácido nítrico y agua. Por otro lado, se realizaron visitas a la caldera y a la planta de tratamiento de riles, donde se pudieron obtener datos acerca del vapor utilizado en los lavados, con lo cual se pudo

determinar consumos de vapor para este sistema. Sin embargo, en la planta de tratamiento de riles no se encontraron datos que puedan complementarse a este estudio, por lo que se dejó fuera de los límites del sistema. Por último, como se tenía registro de los tiempos de lavado, utilizando las potencias de las bombas de alimentación y retorno de los objetivos, se podía cuantificar el consumo energético en los lavados.

Debido a que el ácido nítrico solo se emplea en lavados semanales, su contribución en comparación a la soda en el inventario de ciclo de vida era de un 7%, por lo que no será considerado en la evaluación de desempeño ambiental. Es por esta razón, que los insumos considerados en este estudio serán los siguientes:

- Vapor, generado a partir de una caldera de Biomasa en MJ.
- Electricidad, implicada en el consumo de las bombas, kWh.
- NaOH (soda), químico mayormente utilizado, kg.

3.2 Recopilación de datos

Para la obtención de los datos del CIP de recepción de leche, se realizaron distintas actividades para poder determinar los consumos generalizados del sistema y para la cuantificación de las oportunidades de ahorro detectadas por ECOLAB. La metodología empleada para obtener los datos para cada ítem se menciona a continuación, mientras que la base de cálculo y la cuantificación, se encuentra disponible en el Anexo A y B respectivamente.

- **Determinación de consumo de agua:**

Para cuantificar el consumo de agua del CIP, fue necesario contar con el flujo utilizado para enjuagar cada objetivo y el tiempo de los enjuagues finales e intermedios. Para esto se realizaron las siguientes actividades:

1. Revisión de los programas del CIP, para registrar los flujos utilizados para lavar silos, estanques, camiones y líneas de proceso y los tiempos de enjuague final establecidos en el programa.

2. Cuantificación del consumo de agua diario, tomando una base de cálculo en base a los camiones, silos, estanques y líneas que se lavan diariamente. Información extraída de los registros de lavados diarios que maneja la planta.

3. Cuantificación del consumo de agua semanal en enjuagues intermedios, en base a la cantidad de camiones, silos, estanques y líneas que se lavan semanalmente con soda y ácido. Información extraída de los registros de lavados semanales que realizan los operadores.

- **Determinación del consumo energético:**

El consumo energético del sistema estudiado se vincula directamente a la potencia de las bombas de salida y retorno del CIP presentes en cada línea, por lo que, este consumo se obtuvo relacionando los tiempos de lavado por objetivo y las bombas involucradas en el proceso. Para esto, se recopiló la información de las potencias de cada bomba, observando la placa que se encuentra en el motor. Por otro lado, los tiempos de lavado promedio fueron calculados en base a los registros de los lavados diarios por cada línea.

1. Registro en terreno de las potencias de las bombas de salida y retorno del CIP, por cada objetivo.

2. Cuantificación del tiempo promedio de lavado de objetivos por línea. Se anotaron los registros diarios y en base a ello se calculó un tiempo promedio por cada línea.

3. Cuantificación del consumo energético diario, relacionando el tiempo ocupado en lavados al día y el número de objetivos diarios. Esto, sumado a que ambas bombas, de salida y retorno, funcionan durante todo el tiempo de limpieza.

- **Determinación del consumo de vapor:**

Para cuantificar el consumo de vapor en primer lugar se visitó la caldera que suministra vapor a la planta para identificar las condiciones de presión y temperatura del vapor que se alimenta hacia el área de recepción de leche. En segundo lugar, se visualizó que en el área había un reductor de presión y un manómetro que indicaba la presión a la cual este entraba al intercambiador de calor. Con estos antecedentes, el vapor se calculó como la masa de vapor saturado necesaria para calentar la recirculación de detergente, los pre-enjuagues y enjuagues intermedios, tomando como referencia los deltas de temperatura, entregados por el indicador de temperatura del CIP. En este contexto, la metodología fue la siguiente:

1. Registro en terreno de la presión de vapor de entrada al intercambiador de calor, visualmente en un manómetro.
2. Determinación de la temperatura y entalpía del vapor, asumiéndolo como vapor saturado.
3. Visualización del delta de temperaturas en cada etapa de lavado que implica vapor. Información disponible en el programa CIP en computador.
4. Cuantificación de la masa de vapor necesaria para lograr el delta de temperatura para el flujo a calentar, registrando el tiempo en el cuál la válvula de vapor estuvo abierta.

- **Determinación del consumo de insumos químicos:**

La concentración de insumos químicos se reduce a través de los lavados por dilución cuando se realiza el empuje con agua para dar paso al enjuague intermedio o final. De esta manera, el consumo de insumos químicos se calculó multiplicando el tiempo de empuje, por el flujo y la concentración del químico, dando con las pérdidas de detergente que se tienen por lavado. En este proceso se realizaron las siguientes actividades:

1. Registro del tiempo de empuje, como el tiempo en el cual termina la recirculación de químicos hasta que en el retorno la conductividad desciende por debajo de los 20 mS. Realizado mediante cronometrización en terreno con un dispositivo móvil.

3.3 Obtención de datos para inventario del ciclo de vida

Los insumos anuales calculados como se mencionó en el capítulo 3.2 y especificados en el Anexo B, se llevaron a consumos mensuales para ser normalizados en base a los m³ de leche procesados por la planta al mes, siendo esta la unidad funcional utilizada en este estudio. De los insumos utilizados en el CIP de recepción de leche, para determinar los aspectos e impactos ambientales asociados al proceso, se utilizaron aquellos relacionados a la producción de hidróxido de sodio, electricidad y vapor. Para esto, se empleó el software SimaPro versión 9.1 y la base de datos de Ecoinvent, usando como base los procesos identificados en la tabla 3.3.1 siguiente.

Tabla 3.3.1. Procesos de Ecoinvent para la producción de insumos (Elaboración propia).

Insumo	Proceso Ecoinvent
NaOH (50%)	<i>1 kg Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} chlor-alkali electrolysis, membrane cel</i>
Electricidad (SEN)	<i>1 kWh Electricity, high voltage {CL} market for Conseq, U</i>
Generación de vapor (MJ)	<i>1 MJ Heat, onsite boiler, hardwood mill, average, SE/MJ/RNA</i>

Para el hidróxido de sodio y el vapor, se utilizaron los procesos originales de Ecoinvent. El proceso seleccionado para el hidróxido de sodio fue producción de este insumo al 50% con tecnología de membranas y para el vapor se seleccionó un proceso de generación de este insumo a través de aserrín como biomasa. Por otro lado, la determinación del inventario relacionado a la generación de electricidad se realizó adaptando el proceso de Ecoinvent a la matriz eléctrica chilena, actualizando las contribuciones energéticas según información de Generadoras de Chile (2022) para el año 2022 las cuales se pueden observar en la tabla 3.3.2:

Tabla 3.3.2. Fuente de generación eléctrica y contribución a la matriz energética año 2022. (Elaboración propia)

Geotérmica	0,6%
Termoeléctrica a carbón	23,2%
Hidroeléctrica	24,5%
Gas natural	19,1%
Petróleo	2,2%
Eólica	10,7%
Biomasa	2,3%
Solar	17,4%

3.4 Selección del modelo de evaluación de impactos ambientales

Para comparar los impactos ambientales asociados a la aplicación de las oportunidades de ahorro detectadas en el sistema CIP estudiado, se seleccionaron las categorías de impacto ambiental intermedias y finales del modelo ReCiPe. En la tabla 3.4.1, se muestran las categorías de impacto seleccionadas:

Tabla 3.4.1: Categorías de impacto ambiental intermedias utilizadas en el estudio (Elaboración propia)

Categoría de impacto	Unidad
<i>Cambio climático</i>	<i>kg CO₂ eq</i>
<i>Agotamiento de capa de ozono</i>	<i>kg CFC-11 eq</i>
<i>Acidificación</i>	<i>kg SO₂ eq</i>
<i>Eutrofización agua dulce</i>	<i>kg P eq</i>
<i>Toxicidad humana</i>	<i>kg 1,4-DB eq</i>
<i>Oxidación fotoquímica</i>	<i>kg NMVOC</i>
<i>Formación de material particulado</i>	<i>kg PM10 eq</i>
<i>Uso de agua</i>	<i>m³</i>
<i>Agotamiento de metales</i>	<i>kg Fe eq</i>
<i>Agotamiento de recursos fósiles</i>	<i>kg oil eq</i>

En base a estas categorías, se cuantifican las categorías de impactos finales, las cuales son las siguientes:

- Daño a la salud humana (Años de vida saludable ajustados por discapacidad, DALY)
- Daño al medioambiente (especies desaparecidas/ año)
- Daño a los recursos naturales (US\$/año)

Para la obtención de los impactos finales, se multiplican los impactos intermedios por los factores de caracterización “Hierarchist”, los cuales fueron extraídos desde Huijbregts et al. (2017), según se muestra en la tabla 3.4.2:

Tabla 3.4.2. Factores de caracterización para la obtención de los impactos finales del modelo ReCiPe. (Elaboración propia)

Categorías de impacto	Daño a la salud humana (DALY)	Daño al medioambiente (especies/año)	Daño recursos naturales (US\$)
Cambio climático	$9,3 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-9}$	-
Agotamiento de capa de ozono	$5,3 \times 10^{-4}$	-	-
Acidificación	-	$2,1 \times 10^{-7}$	-
Toxicidad humana	$3,3 \times 10^{-6}$	-	-
Eutrofización agua dulce	-	$6,1 \times 10^{-7}$	-
Oxidación fotoquímica	-	$1,7 \times 10^{-7}$	-
Formación de material particulado	$6,3 \times 10^{-4}$	-	-
Uso de agua	$2,2 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-8}$	-
Agotamiento de metales	-	-	$2,3 \times 10^{-1}$
Agotamiento de recursos fósiles	-	-	$4,6 \times 10^{-1}$

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de este trabajo. En primera instancia, se describe el sistema CIP analizado, el programa de lavado y los consumos asociados a esta programación. En seguida, se identifican medidas para el mejoramiento del desempeño del CIP y la cuantificación del ahorro al ser implementadas. Por último, se comparan los resultados de la evaluación ambiental de ciclo de vida de la operación actual y de la propuesta de mejoramiento.

4.1 Sistema CIP área de recepción de leche.

El sistema estudiado corresponde al CIP encargado de la limpieza de silos, estanques y camiones lecheros, que se encuentran en el área donde se receptiona y almacena la leche que llega a la planta. En este sector, llegan los camiones y descargan la leche, suero y el concentrado proteico de leche a los silos y estanques destinados a almacenar estas materias primas. Luego que el contenido es receptionado, éste se envía al área productiva para ser procesado. En este contexto, el CIP se encarga de la limpieza y desinfección de todo el sistema que forma parte del área de recepción de leche. (Ver en la figura 4.1.1.)

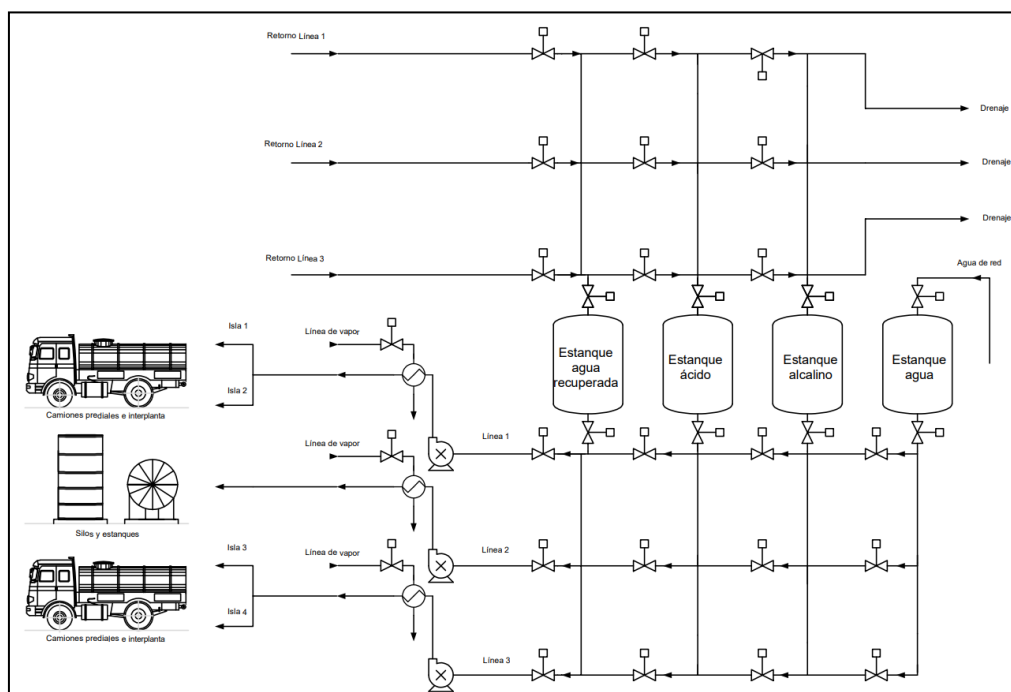


Figura 4.1.1. Diagrama del sistema CIP en el área de recepción de leche. (Elaboración propia).

En la figura 4.1.1, se observa que el CIP consiste en un sistema de cuatro estanques: el primero contiene agua de red, el segundo posee detergente alcalino, el tercero almacena ácido y el último contiene el agua recuperada de los enjuagues finales de los lavados. Estos estanques, alimentan las líneas 1, 2 y 3, donde cada una de éstas tiene distintos programas de lavado y los sistemas de bombeo e intercambio de calor son independientes para cada línea, tal como se muestra en la figura anterior. Cada línea cuenta con válvulas y sensores, los cuales se ubican en la salida y retorno de cada estanque. Estos son de vital importancia para cumplir con los parámetros de lavado, tales como temperatura, concentración y flujos.

- **Sensores de conductividad:** Tienen la función de entregar los valores de conductividad en [mS/cm], indicando de esta forma la concentración a la cual se encuentra el detergente que está recirculando. En la programación, se establece un valor de *set point*, en donde el sistema comenzará a lavar cuando el conductímetro del retorno marque el valor estimado.
- **Sensor de temperatura:** Al igual que los conductímetros, el sistema comenzará a lavar cuando el sensor marque la temperatura establecida por programación en el retorno.
- **Flujómetro:** Indican el flujo en el cual se está lavando el objetivo.

En base a este sistema CIP, para obtener el inventario de ciclo de vida a utilizar en este estudio, se debe tener en cuenta las cantidades de equipos a limpiar, detergentes utilizados, programas de limpieza, entre otros, los cuales se abordan en detalle a continuación:

Configuración del sistema CIP:

El sistema CIP corresponde a un circuito con recirculación de detergentes que cuenta con cuatro estanques de 6 m³ cada uno.

- **Estanque de agua:** agua de red
- **Estanque de alcalino:** NaOH (50%)
- **Estanque de ácido:** HNO₃ (60%)
- **Estanque de agua recuperada:** agua recuperada de pre-enjuagues, además de un pequeño porcentaje de detergente diluido.

Para calentar el contenido de los estanques que contienen detergentes, se realiza el proceso de “make-up”, en el cual se hace recircular el detergente a calentar hasta llegar a una temperatura de *set point*. Este proceso se realiza a través de los intercambiadores dispuestos en cada línea.

Objetivos de limpieza:

Las líneas 1 y 3 se encargan de lavar los camiones prediales e interplanta que llegan a descargar a las islas de recepción de la planta. El sistema consta de 4 islas, dos por cada línea. Por la configuración del CIP, se pueden lavar dos camiones simultáneamente y estos son lavados inmediatamente después de finalizar su descarga.

Por otro lado, la línea 2, es aquella encargada de lavar silos de leche y estanques de concentrado proteico de leche (CPL), los cuales son lavados inmediatamente después de ser vaciados. En esta línea, se lavan silos que van desde los 50.000 litros, hasta los 107.000 litros con el mismo programa y sistema de lavado. Además de los objetivos anteriormente nombrados, cada línea se limpia una vez al día durante la noche.

Programa de lavado:

Existen dos programas de lavados disponibles para cada línea. El más frecuente, es aquel que consiste en un lavado alcalino, el cual se realiza cada vez que se lava el objetivo. Por otro lado, está el lavado soda y ácido, el cual se ejecuta una vez a la semana para cada objetivo y en el caso de los silos, también se realiza cuando se efectúa un cambio del tipo de contenido que este va a almacenar. Los programas actuales, se mencionan a continuación:

Programa de lavado alcalino:

1. Pre-enjuague inicial con agua recuperada de los enjuagues finales y solución de soda diluida a 0,1% (5 mS) de concentración. El pre- enjuague inicial se realiza a 40 ° C a la salida del intercambiador y 20 ° C en el retorno, solución que va a drenaje.
2. Recirculación de Soda a una concentración de 1,25 – 1,5 %, a una temperatura de 65 ° C en el retorno.
3. Recuperación de soda y empuje con agua hasta llegar a 5 mS de conductividad.
4. Enjuague final con agua de red a temperatura ambiente. Esta agua se lleva al estanque de agua recuperada.

Tiempo total aproximado línea 1 y 3: 16 minutos

Tiempo total promedio línea 2: 27 min

Programa de lavado Soda / Ácido:

1. Pre-enjuague inicial con agua recuperada de los enjuagues finales y solución de soda diluida a 0,1% (5 mS) de concentración. El pre- enjuague inicial se realiza a 40 ° C a la salida del intercambiador y 20 ° C en el retorno y va hacia drenaje.
2. Recirculación de Soda a una concentración de 1,25 – 1,5 %, a una temperatura de 65 ° C en el retorno.
3. Enjuague intermedio con agua de red a 40 °C en la salida y 20 °C al retorno.
4. Recirculación de ácido nítrico a 40 mS de conductividad y 40 ° C de temperatura.
5. Recuperación de soda y empuje con agua hasta llegar a 5 mS de conductividad.
6. Enjuague final con agua de red a temperatura ambiente. Esta agua se lleva al estanque de agua recuperada.

Tiempo total promedio línea 1 y 3: 25 min

Tiempo total promedio línea 2: 50 min

La cuantificación de los consumos del CIP, en base a la programación establecida se calcularon según se explica en el anexo A y se encuentran especificados en el anexo B. Los resultados para los consumos anuales del CIP de recepción de leche fueron los que se pueden observar en la tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1: Consumos del CIP de recepción de leche. (Elaboración propia)

Insumo	Consumo anual
NaOH	34.850 kg
HNO ₃	3.654 kg
Agua	32.772 m ³
Electricidad	100.380 kWh
Vapor	8.606.218 MJ

En base a esta programación existente, se realizó una auditoria para identificar y cuantificar oportunidades de ahorro en agua, químicos, vapor, tiempo y consumo eléctrico.

4.2 Medidas de mejora en el CIP

Las medidas de mejora detectadas en el CIP de recepción de leche surgen en respuesta a problemáticas que fueron detectadas en terreno mediante auditoría. Dentro de las oportunidades de ahorro identificadas se encuentran las siguientes:

Pre-enjuague deficiente: Se observó que durante el lavado de silos y estanques la solución de pre-enjuague contenía muchas trazas de leche al concluir el tiempo de esta etapa, generando con esto la aparición de espuma en el estanque de soda.

Generación de espuma: El estanque de soda luego del lavado de silos y estanques presenta rebalse por espuma, generando que solución alcalina se drene y no se recupere.

Estanque de recuperación sin nivel: El estanque de recuperación, tal como se mencionó en el apartado 4.1, se llena con agua de los enjuagues finales. Sin embargo, debido a que los camiones consumen más agua en los pre-enjuagues que en los enjuagues finales, este estanque se vacía progresivamente quedando sin nivel al lavar 15 camiones. Esta problemática, genera un mayor consumo de agua de red.

Tiempos de lavado mayores a la programación: Se identificó que existían problemáticas que generaban que los tiempos de lavado fueran mayores a los que se encuentran estipulados por programación. Estos tiempos fueron cuantificados y se identifican en las medidas de mejora que se encuentran en este mismo capítulo.

Para combatir estas problemáticas identificadas, se realizaron propuestas de mejora vinculadas a oportunidades de ahorro en agua, electricidad, vapor y químicos, las cuales se cuantificaron como se ilustra en el anexo B y se describen a continuación:

1. Recuperación de solución desde 20 a 5 mS con destino a drenaje (Agua):

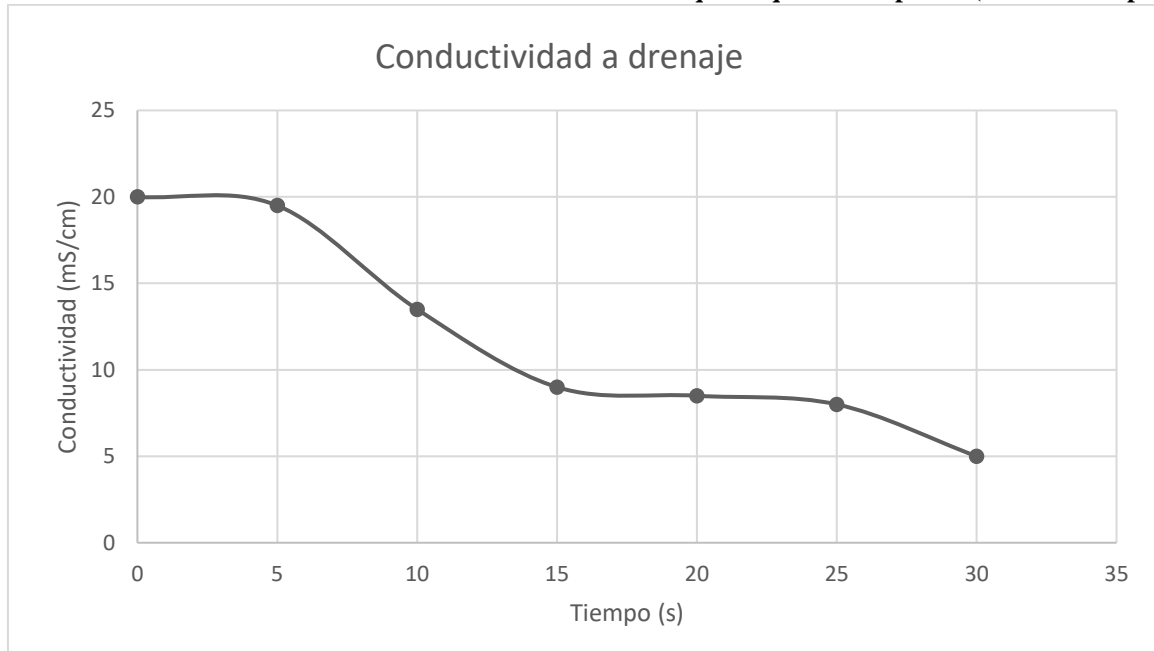
Solución que iba a drenaje debido a la programación del CIP, se propuso enviarla al estanque de recuperación para poder darle mayor alcalinidad a los pre-enjuagues y así también disminuir el consumo de agua industrial. Se cuantificó mediante las siguientes actividades:

✓ Verificación en terreno de cuánto tiempo la solución de 20 mS iba a drenaje, mediante una sonda LMI.

✓ Medición de concentración de Soda mediante titulación, aplicando tres gotas de indicador fenolftaleína y luego agregando gotas de ácido nítrico como reactivo titulante.

El tiempo y la conductividad medida se puede observar en la figura 4.2.1, donde se muestran las mediciones realizadas por la sonda de conductividad en el drenaje al efectuar un lavado de un camión.

Figura 4.2.1: Mediciones de sonda de conductividad de solución que se quiere recuperar. (Elaboración propia)



Esta medición fue realizada para un camión que se lavó a un flujo de 20.000 L/h, de esta forma estos 30 segundos equivalen a recuperar 166 litros por lavado aproximadamente. De esta forma, al recuperar esta solución a 20 mS, equivalente a una concentración cercana al 0,5% en peso de soda, se genera un pre-enjuague más eficiente al generar una mayor alcalinidad en el agua de recuperación, además de una recuperación de calor, ya que, esta solución se encuentra a 60 °C.

2. Recuperación de solución a drenaje por generación de espuma (Agua):

Al generarse presencia de espuma en el estanque de soda, el indicador de nivel marca nivel máximo durante la recirculación, resultando en que la solución a una concentración del 1% en peso se vaya a drenaje. Por esta razón se propuso enviar esta solución al estanque de recuperación cada vez que ocurra este hecho. Para cuantificarlo, se analizó en terreno la frecuencia en la cual ocurría este hecho, observando que esto sucedía aproximadamente en 3 de cada 4 lavados. Se cuantificó mediante las siguientes actividades:

- ✓ Verificación en terreno del rebalse por espuma y envío de soda a drenaje, identificación con fenolftaleína para verificar que solución alcalina se estaba yendo a drenaje.
- ✓ Medición del tiempo en el cual la soda al 1% se va a drenaje mediante cronometrización con dispositivo móvil.
- ✓ Identificación de los objetivos que generaban espuma mediante inspección de los pre-enjuagues, observando la claridad del agua a drenaje.

Al igual que en la propuesta 1, esta medida incrementa la eficiencia de los pre-enjuagues y con ello poder reducir la generación de espuma.

3. Ajuste de la programación de enjuagues intermedios líneas 1 y 3 (Agua):

Se identificó mediante una revisión de la programación, que los enjuagues intermedios de la línea 1 ocupaban más tiempo que los de la línea 3. Mediante revisión de los registros, se determinó que ambas líneas lavaban los mismos objetivos, por lo que, este tiempo extra de 80 segundos de diferencia, correspondía con un consumo extra de agua.

4. Identificación de efecto piscina en camión lechero (Agua):

Se observó que un camión específico demoraba más tiempo en la etapa de empuje luego de la recirculación de soda y que este quedaba con agua luego de los enjuagues finales, lo que incurría en mayor tiempo de lavado. Las actividades realizadas para determinar el consumo extra de agua fueron las siguientes:

- ✓ Se llenó el estanque de agua industrial previo a un lavado y luego se volvió a llenar al terminar, cuantificando de esta forma cuánta agua se utilizó para lavar este objetivo específico.
- ✓ Se realizó una inspección para determinar la causa de este problema, resultando ser el diámetro estrecho de las salidas del camión.

5. Proposición de cambio de *spray balls* (Agua):

Se realizaron consultas en terreno para determinar que *spray balls* utilizaban en los silos del área de recepción. En base a esto, se encontró que se utilizaban del tipo estáticas, por lo que se propuso la modificación de estas a un modelo orbital, el cual utiliza menor cantidad de agua.

Para la realización de esta propuesta, se realizó una revisión de las características de las *spray balls*, las cuales trabajan a distintos flujos y presiones dependiendo del tipo que se utilice (Bénézech

y Lalande, 2002; Tetra Pak, 2023). Los tipos de *spray balls* y sus características se encuentran descritos en el Anexo H.

6. Proposición de retorno de condensado (Agua y vapor):

El condensado generado por el vapor utilizado en el CIP no se recupera y va a drenaje, por lo que, el ahorro generado de instaurar un sistema de retorno de condensado se cuantificó de la siguiente manera:

- ✓ Cuantificación del vapor utilizado en el CIP, para determinar el condensado que se genera.
- ✓ Cuantificación del impacto que tiene la recuperación de calor generada por retornar condensado a la caldera, induciendo un ahorro de vapor.

7. Eliminación del vapor utilizado en pre-enjuagues y enjuagues intermedios:

Se propuso eliminar la utilización de vapor en estos enjuagues que van a drenaje, debido a que la temperatura fijada como *set point* era de 40 °C y el sistema solo alcanzaba temperaturas hasta 36 °C como máximo. Es por esto, que se propuso eliminar el vapor de pre-enjuagues y enjuagues intermedios, debido a que, al introducir las mejoras 1 y 2, se recupera solución alcalina que además se encuentra a una temperatura de 65 °C, por lo que también se tiene una recuperación de calor. Además de esto, en los pre-enjuagues se recomienda una temperatura menor a 40 °C para eficientar la fase de lavado posterior (Lelieveld et al., 2005).

8. Proposición de calentamiento de soda 5 ° C bajo la temperatura actual (Vapor):

El *set point* de temperatura para la recirculación de soda es de 50°C en el retorno, pero el que se tiene como promedio actualmente es de 65°C. La proposición es bajar la temperatura de salida en el intercambiador 5°C menos para obtener 60°C en el retorno. Esta medida se justifica debido a que las temperaturas recomendadas para la operación de una solución alcalina van desde los 50 a los 70 °C (Bénézech y Lalande., 2002).

9. Recirculación de soda a menor conductividad (químicos y consumo energético):

Se propuso bajar el *set point* de conductividad de la soda de un 1% a un 0,5%, debido a que esto, implica lavar en menor tiempo y se obtienen los mismos resultados en los lavados. Esto en base a que, en los registros históricos de los lavados del CIP, se observó que mayores conductividades se relacionaban a tiempos de lavado más extensos. Para cuantificar este tiempo extra, se hizo seguimiento

a objetivos específicos, observando cómo se comportaban estos al lavarlos a mayor conductividad y registrando la diferencia de tiempo.

Esta proposición se justifica debido a que se recomienda que los lavados alcalinos se realicen entre 0,15% y un 5% (Pant et al., 2023; Thomas y Sathian, 2014) y, además de esto, una planta similar a la estudiada pero instalada en la Región de los Lagos, trabaja a un 0,5% de conductividad en el mismo tipo de sistema CIP con resultados óptimos.

10. Optimización de la inyección automática de soda (consumo energético):

Actualmente no se inyecta soda al estanque de manera automática, resultando en mayores tiempos de lavado para los tres estanques y un silo, generando mayor consumo energético. Se propuso optimizar el tiempo de esta inyección automática para reducir los tiempos de los lavados. Este tiempo extra, se cuantificó en base a la revisión de las curvas de conductividad de los objetivos anteriormente nombrados, donde se observó el tiempo en el cuál estas se quedaban recirculando a una misma conductividad sin llegar al set point.

La cuantificación de estas oportunidades de ahorro se encuentra listada en la tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1: Oportunidades de ahorro cuantificadas para el CIP de recepción de leche. (Elaboración propia)

Oportunidad de mejora	Agua (m ³ /año)	Vapor (Ton/año)	Energía (kWh/año)	NaOH (kg/año)	HNO ₃ (kg/año)
1. Recuperación de solución a 20 mS	2.931	-	-	-	-
2. Recuperación por generación de espuma	3.296	-	-	-	-
3. Ajuste de programación enjuagues intermedios	427	-	-	-	-
4. Efecto piscina en camión	856	-	-	-	-
5. Cambio de <i>spray balls</i>	846	-	-	-	-
6. Retorno de condensado a caldera	1.787	390	-	-	-
7. Eliminación de vapor de enjuagues	-	796	-	-	-
8. Calentamiento de Soda 5°C bajo la T° actual	-	122	-	-	-
9. Recirculación de químicos a menor conductividad	-	-	10.091	17.425	1.226
10. Optimización inyección automática de Soda	-	-	1.006	-	-
TOTAL	10.143	1.308	11.097	17.425	1.226

Aplicando las respectivas oportunidades de ahorro listadas en la tabla anterior, la programación y los consumos luego de aplicar las medidas de mejora quedan según se muestra en la tabla 4.2.2:

Tabla 4.2.2: Consumos mensuales por escenario del CIP de recepción de leche (Elaboración propia).

	1. CIP recepción de leche actual	2. CIP recepción de leche optimizado
Pre-enjuagues	40 °C	27 °C
Recirculación alcalina	70 ° C, 1%	65 ° C, 0,5%
Consumo de NaOH mensual, kg	2.904	1.452
Consumo energético mensual, kWh	8.365	7.440
Consumo de agua, m3 mensuales	2.731	1.886
Consumo de vapor, MJ mes	717.815	414.165

De la tabla 4.2.2, se puede observar que una reducción de la temperatura de los pre-enjuagues en 13 °C y una recirculación de soda a 5 ° C por debajo de la programación actual, genera un ahorro en vapor de un 30%. Por otra parte, al incluir la recuperación de condensado a la caldera hace que este valor se incremente y suba a un 42%, lo que equivale al ahorro de 390 ton más de vapor al año. De estas propuestas, solo la eliminación del uso de vapor de los pre-enjuagues es aplicable de forma inmediata, significando una reducción anual de 796 toneladas de vapor.

Por otro lado, el introducir las medidas de mejora en la inyección de soda, reducir la concentración de químicos a la mitad y modificar las salidas del camión con efecto piscina, ocasiona que los tiempos de lavado se reduzcan, lo que genera un ahorro energético de un 11%. Luego, esta misma reducción de consumo de químicos, al bajar el *set point* desde un 1% a 0,5%, equivale de manera directa a un 50% menos de consumo de soda.

Por último, en cuanto al consumo de agua, introducir la recuperación de solución al ocurrir la generación de espuma y realizar los ajustes de programación para recuperación y de los tiempos de enjuagues intermedio, trae consigo una reducción del 23% del consumo de agua, lo cual equivale a un ahorro de 6.654 m³ de agua. Sin embargo, al adicionar aquellas propuestas que requieren inversión como lo son el cambio de *spray balls*, arreglo de las salidas del camión y la recuperación de condensado, el ahorro se incrementa hasta un 31%.

Al introducir estas mejoras, además del ahorro visible que generan, se espera un efecto positivo en el desempeño ambiental del CIP, por lo cual se realizó la evaluación ambiental de ciclo de vida en base a un objetivo, unidad funcional y límites del sistema fijados, cuyos resultados principales se presentan en los párrafos siguientes.

4.3 Objetivo y alcance del estudio

El objetivo de este estudio es cuantificar, analizar y comparar los impactos ambientales que conllevan los proceso CIP de estanques, silos y camiones de leche, al ser optimizados mediante la detección e identificación de oportunidades de mejora en el proceso, en base a monitoreos y estudios realizados por ECOLAB.

4.4 Unidad funcional

Los insumos utilizados en el sistema CIP estudiado, serán cuantificados con respecto a la unidad funcional de un metro cúbico de leche procesada en la planta, debido a que de este valor depende la cantidad de lavados llevados a cabo en el área de recepción de leche.

Unidad funcional: 1 m³ de leche procesada.

4.5 Límites del sistema

Los límites del sistema estudiado incluyen la producción de todos los principales insumos utilizados en el proceso de limpieza en el lugar del área de recepción de leche, como los son el ácido nítrico, hidróxido de sodio, agua, vapor y electricidad. Este sistema comprende solo los insumos que entran y salen del sistema CIP, sin considerar el transporte de estos ni su disposición final, tal como se muestra en la figura 4.5.1.

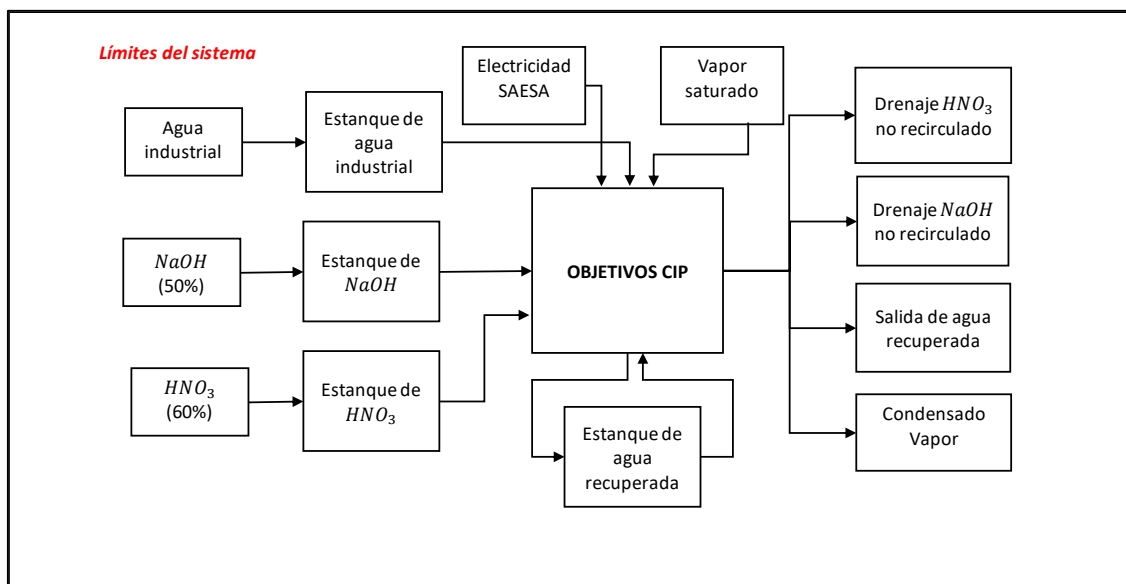


Figura 4.5.1. Límites del sistema CIP recepción de leche. (Elaboración propia)

Tal como se mencionó en el inciso 4.1, la cantidad de ácido nítrico representa menos del 7% con respecto al consumo de hidróxido de sodio, por lo que no se consideró en la evaluación. Por otro lado, el vapor utilizado proviene de una caldera de biomasa que utiliza aserrín como materia prima para alimentar a toda la planta, sin embargo, para los fines de este estudio solo se considera su contribución ligada al vapor utilizado en el CIP, por lo que, no está considerado dentro de los límites del sistema. Por último, la electricidad generada por el servicio eléctrico nacional (SEN), se considera como el abastecimiento del CIP y también para la producción del hidróxido de sodio (NaOH) y la generación del vapor de caldera.

4.6 Análisis de inventario

Los datos utilizados para la elaboración del inventario fueron calculados mediante la metodología descrita en el inciso 4.2 y los cálculos se encuentran detallados en el anexo B. En este caso, se distinguen dos escenarios:

1. **Escenario CIP RDL 1:** Proceso con los consumos actuales, previo a la detección de oportunidades de ahorro y cambio de parámetros.
2. **Escenario CIP RDL 2:** Proceso CIP con propuesta de optimización.

El inventario mostrado en la tabla 4.2.2, corresponde al consumo mensual del CIP para ambos escenarios, por lo que estos valores deben ser parametrizados en base a la unidad funcional, es decir, se dividen estos valores por los m³ de leche procesados en un mes, tomando como referencia el valor de agosto del 2023, siendo 1.518 m³ de leche procesada por la planta. Los valores parametrizados se presentan en la tabla 4.6.1, para ambos escenarios:

Tabla 4.6.1: Consumos recepción de leche para escenario actual y aplican propuestas de ahorro, en base a los m³ de leche procesada. (Elaboración propia)

Insumo	Consumo CIP RDL 1	Consumo CIP RDL 2	Unidad
NaOH	1,9x10 ⁰	9,6x10 ⁻¹	kg /m ³ leche
Agua	1,8x10 ⁰	1,2x10 ⁰	m ³ agua /m ³ leche
Energía	5,5x10 ⁰	4,9x10 ⁰	kWh /m ³ leche
Vapor de caldera	4,7x10 ²	2,7x10 ²	MJ /m ³ leche

Para la cuantificación y evaluación de los impactos ambientales del inventario expuesto en la tabla anterior, se requiere el inventario de la producción de 1 kWh de electricidad por el SEN, la producción de 1kg de hidróxido de sodio al 50% en masa y la generación de 1 MJ de vapor por una caldera de biomasa, el cual se tomó en base lo que se ilustra en la tabla 4.3.2.

4.7 Evaluación ambiental de ciclo de vida

En esta sección se resumen los resultados de la evaluación comparativa de ciclo de vida para ambas opciones de proceso del CIP. Los impactos intermedios del modelo ReCiPe se ilustran en la tabla 4.7.1. La figura 4.7.1 compara los impactos intermedios normalizados para las categorías de cambio climático, eutrofización de agua dulce, toxicidad humana y agotamiento de recursos fósiles. Las figuras 4.7.2 y 4.7.3 muestran las contribuciones de la generación eléctrica, hidróxido de sodio y vapor en las diferentes categorías de impacto intermedio. Las figuras 4.7.4 y 4.7.5 presentan dichas contribuciones para las categorías de impacto final del modelo ReCiPe.

Tabla 4.7.1. Impactos intermedios asociados a los consumos actuales del CIP de recepción de leche. (Elaboración propia)

Categoría de impacto	Unidad / m³ leche	CIP RDL 1	CIP RDL 2
<i>Cambio climático</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	3,4x10 ⁰	2,5x10 ⁰
<i>Agotamiento de capa de ozono</i>	<i>kg CFC-11 eq</i>	3,1x10 ⁻⁴	1,8x10 ⁻⁴
<i>Acidificación</i>	<i>kg SO₂ eq</i>	2,5x10 ⁻²	1,8x10 ⁻²
<i>Toxicidad humana</i>	<i>kg 1,4-DB eq</i>	4,5x10 ¹	4,0x10 ¹
<i>Eutrofización agua dulce</i>	<i>kg P eq</i>	4,1x10 ¹	2,1x10 ¹
<i>Oxidación fotoquímica</i>	<i>kg NMVOC</i>	1,8x10 ⁻²	1,3x10 ⁻²
<i>Formación de material particulado</i>	<i>kg PM10 eq</i>	4,8x10 ⁻²	3,5x10 ⁻²
<i>Uso de agua</i>	<i>m³</i>	1,1x10 ⁻¹	7,2x10 ⁻²
<i>Agotamiento de metales</i>	<i>kg Fe eq</i>	3,0x10 ¹	1,8x10 ⁻¹
<i>Agotamiento de recursos fósiles</i>	<i>kg oil eq</i>	1,0x10 ⁰	7,4x10 ⁻¹

De la tabla 4.7.1, se puede observar que la disminución de los consumos implica una reducción de los impactos intermedios para todas las categorías. En este contexto, en la figura 4.7.1 se puede observar que la mayor baja se observa para la eutrofización de agua dulce, pasando de 41 kg P eq a 21 kg P eq, lo cual implica una reducción del 49%. La disminución de este impacto se relaciona

directamente en la propuesta de modificar la concentración de hidróxido de sodio en los lavados desde un 1% a 0,5%.

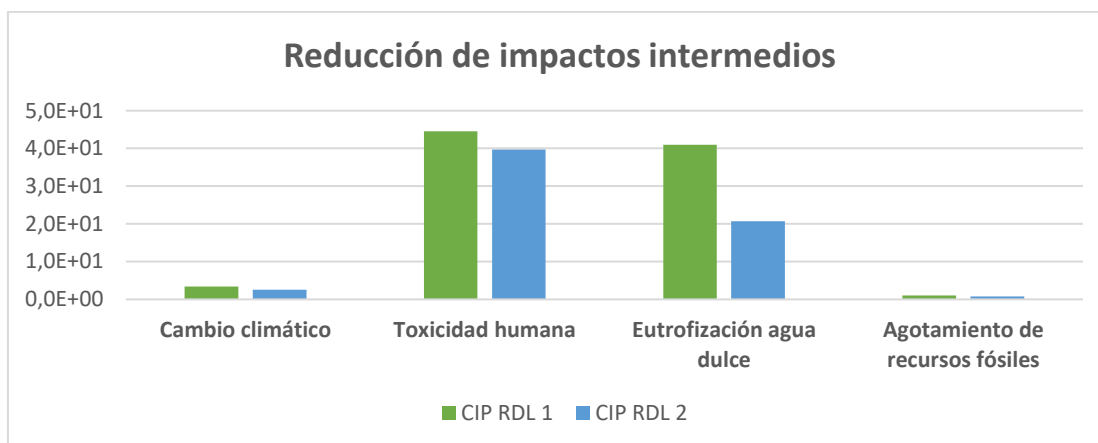


Figura 4.7.1. Impactos intermedios CIP RDL1 Y CIP RDL2. (Elaboración propia)

Esto se justifica mediante lo expuesto en la figura 4.7.2, donde se ilustra la contribución de los insumos utilizados en el CIP de recepción de leche sobre las categorías de impacto, en la cual se observa que la producción de NaOH contribuye en un 100% a la categoría de eutrofización. Por otro lado, en la categoría de toxicidad humana, la reducción de un 11% de este impacto intermedio se relaciona con la reducción del consumo eléctrico de 0,6 kWh/ m³ leche, equivalente a un 11% menos. Por otro lado, las categorías de cambio climático se redujeron desde 3,4 kg CO₂ eq a 2,5 kg CO₂ eq, lo cual se relaciona con el proceso de generación de electricidad, debido a las emisiones generadas por una matriz energética que, según Generadoras de Chile (2022), está compuesta en un 45% por combustibles fósiles.

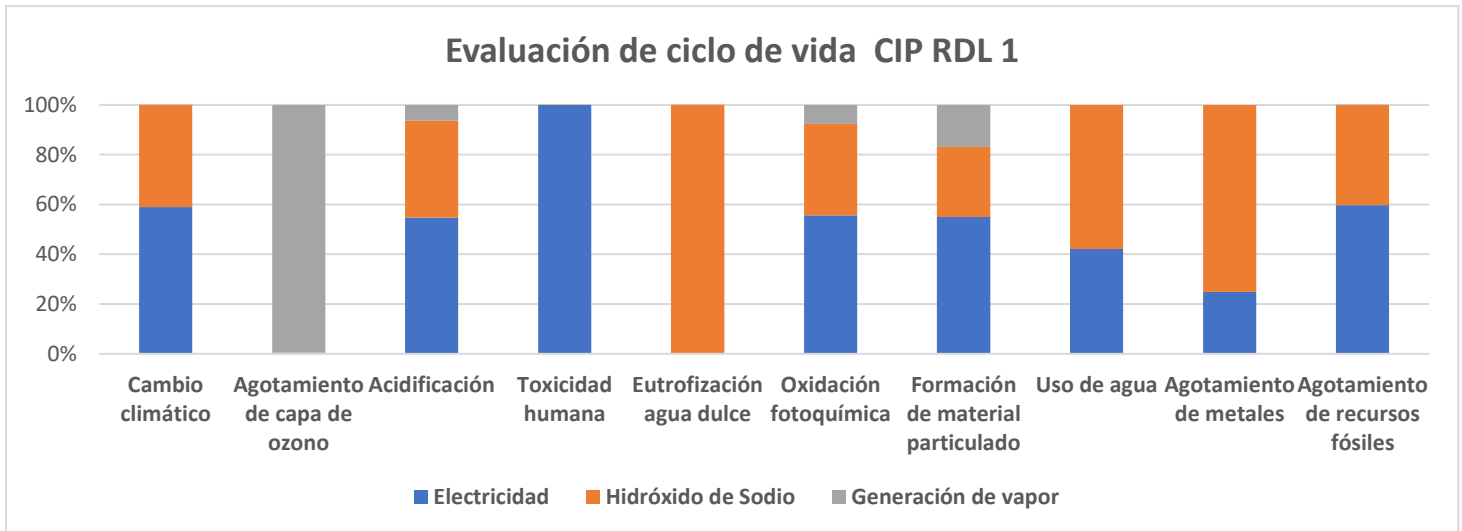


Figura 4.7.2. Impactos intermedios asociados a los consumos actuales del CIP RDL 1. (Elaboración propia).

Comparando la contribución de los insumos sobre los impactos intermedios expuestos en las figuras 4.7.2 y 4.7.3, se muestra que tanto el consumo energético como el hidróxido de sodio se encuentran presentes en ocho de las diez categorías estudiadas. Esto se debe a que estos insumos se encuentran estrechamente relacionados, pues el hidróxido de sodio se produce por medio de la electrolisis del NaCl en solución, proceso llevado a cabo en celdas de membrana, donde según Hong et al. (2014), el 90% de los impactos ambientales derivados de este proceso se deben al consumo eléctrico y producción de sal cruda. Por otro lado, la generación de vapor contribuye en un 100% en el agotamiento de la capa de ozono y tiene un aporte minoritario en las demás categorías de impacto.

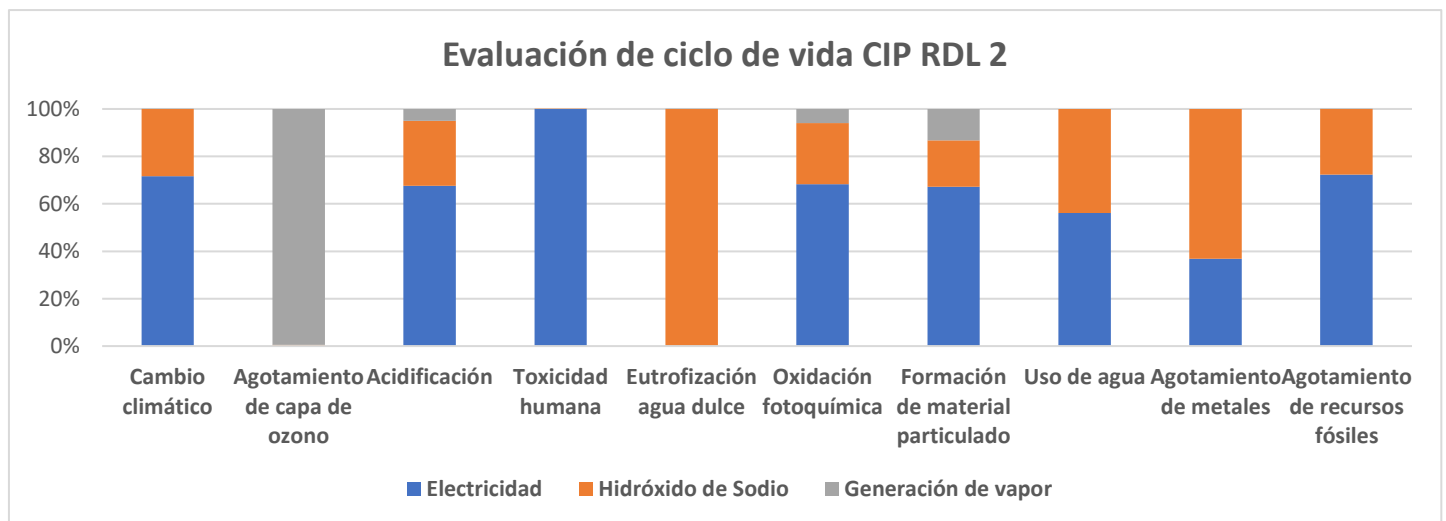
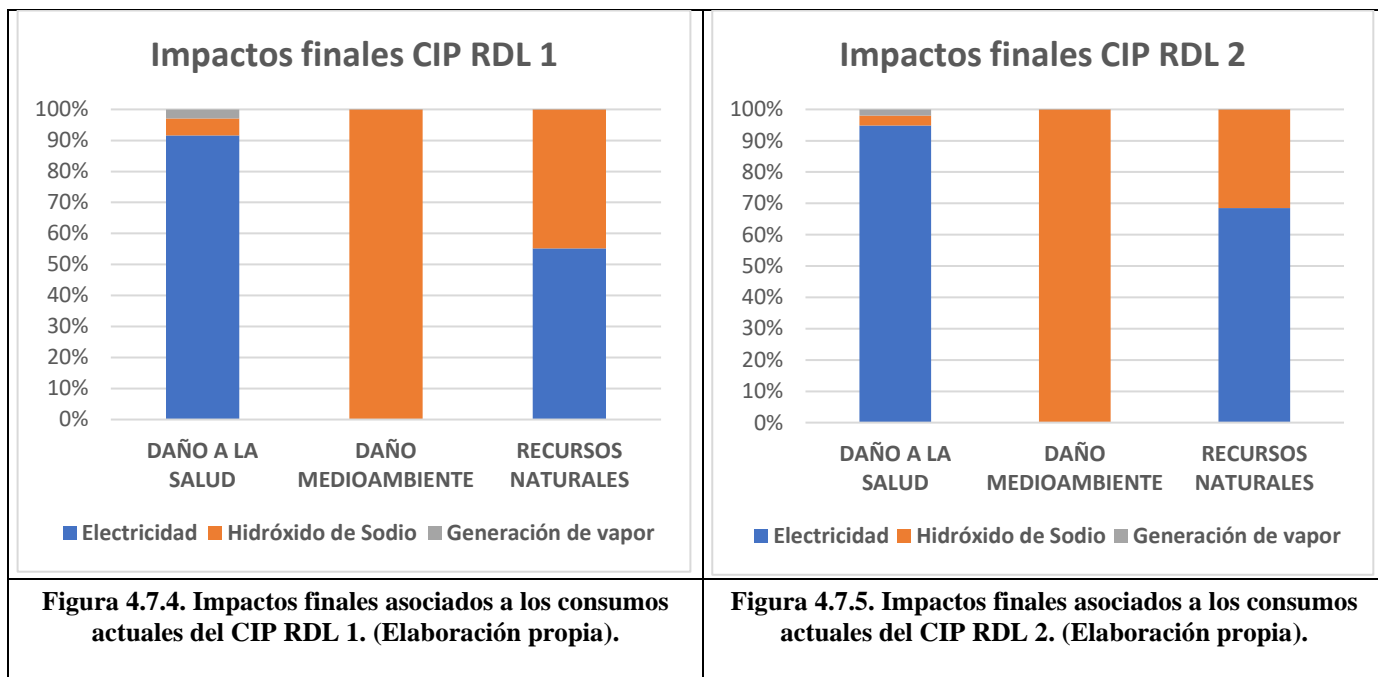
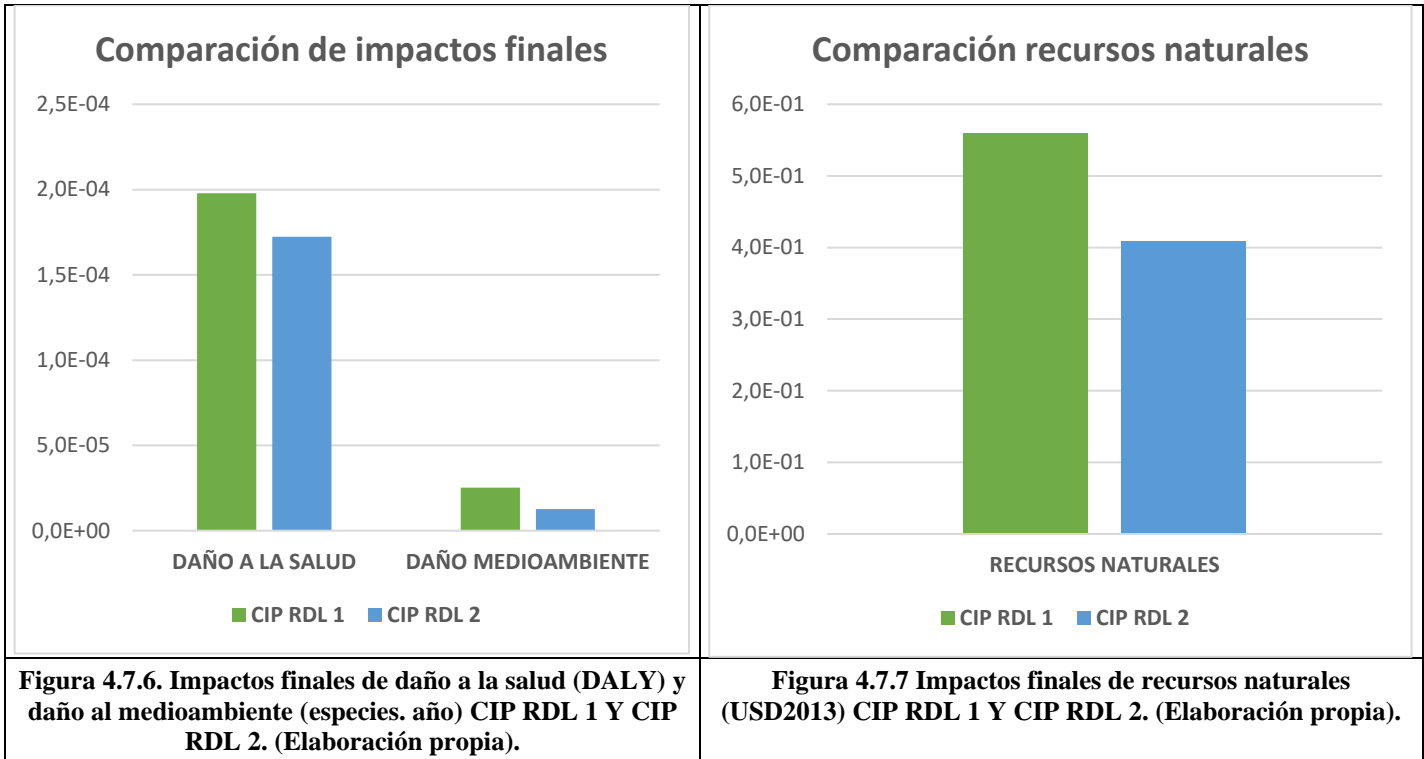


Figura 4.7.3. Impactos intermedios asociados a los consumos proyectados del CIP RDL 2. (Elaboración propia).

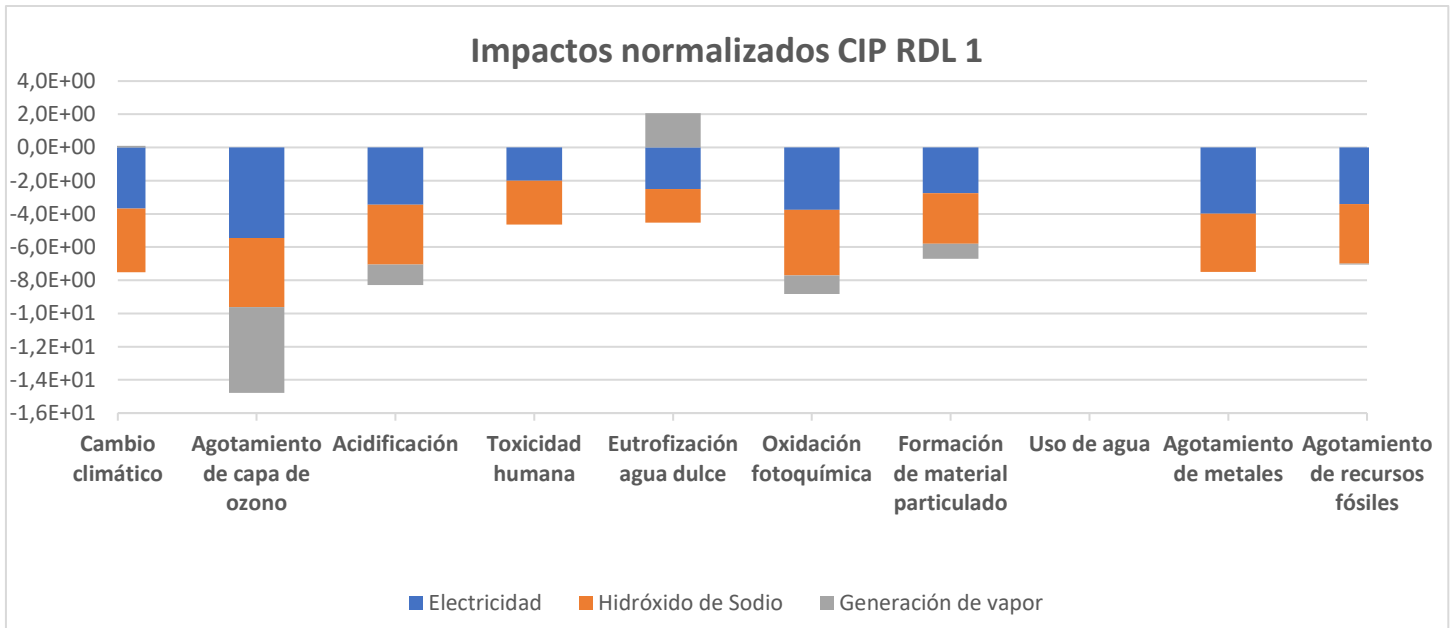
Utilizando los factores de caracterización del modelo ReCiPe, se obtuvieron los impactos finales ilustrados en las figuras 4.7.4 y 4.7.5, donde la principal diferencia se observa en el agotamiento de recursos naturales, principalmente debido al efecto de la reducción del consumo de hidróxido de sodio hace que su contribución pase desde un 45% a un 30% aproximadamente.



En este mismo contexto, se puede comparar las tres categorías de impacto final por separado, donde en las figuras 4.7.6 y 4.7.7 se observa una reducción del impacto final de daño a la salud en un 14% y daño al medioambiente en un 49%, donde la primera está relacionada con la reducción del consumo energético y la segunda con la propuesta de reducción de la concentración de soda en un 50% en el CIP. Por otro lado, el daño a los recursos naturales decrece en un 28%, asociado mayoritariamente a la reducción del consumo eléctrico.



Las figuras 4.7.8, 4.7.9 y 4.7.10 permiten comparar los impactos normalizados.



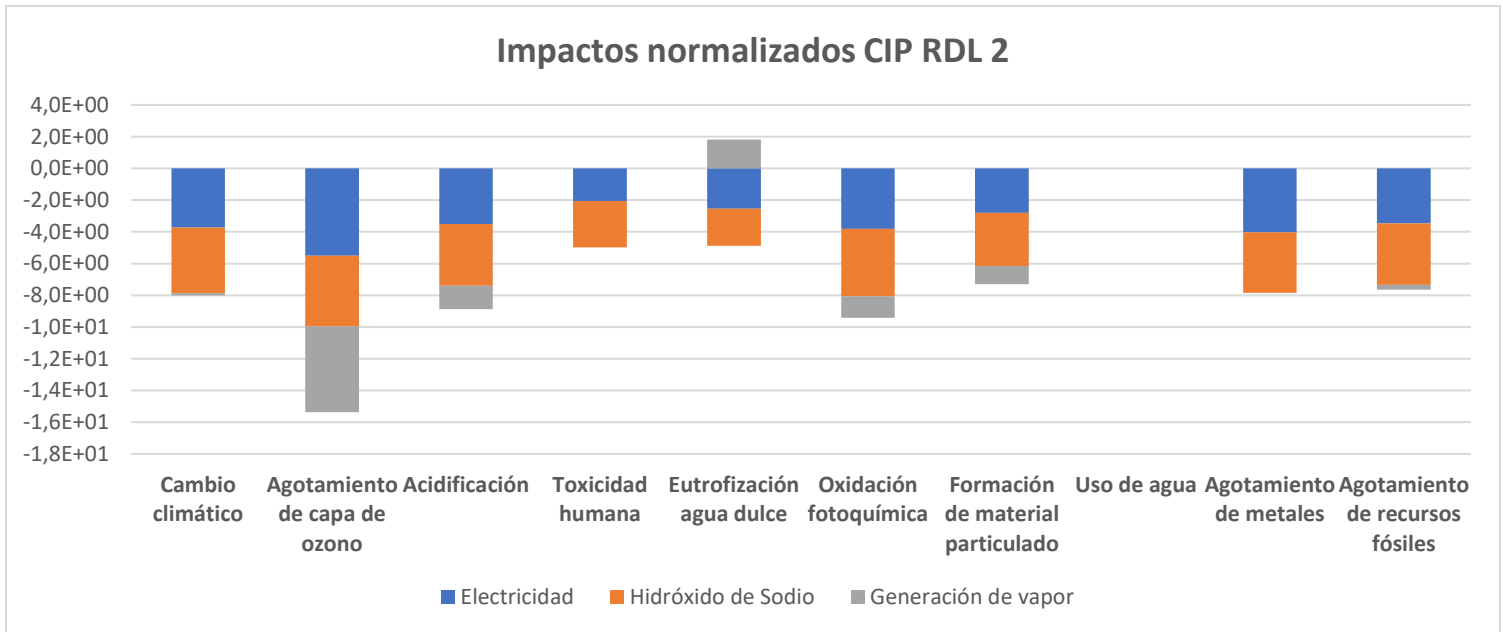


Figura 4.7.9. Impactos normalizados asociados a los consumos proyectados del CIP RDL 2. (Elaboración propia).

De las figuras 4.7.8 y 4.7.9 se puede observar que la eutrofización de agua dulce es la categoría de mayor impacto en el CIP de recepción de leche para ambos casos, debido principalmente a la generación de vapor. Según Huijbregts et al. (2017), el impacto de eutrofización de agua dulce ocurre al descargar nutrientes en cuerpos de agua como ríos y lagos, aumentando los niveles de nitrógeno y fósforo, generando que estos sean absorbidos por organismos como cianobacterias y algas, causando su proliferación y bajando los niveles de oxígeno en el agua. En los insumos utilizados en el CIP de recepción de leche, la generación del vapor en una caldera de biomasa es el proceso de mayor incidencia sobre el potencial de eutrofización, debido a que, según Lozano (2020), se provocan emisiones de compuestos NOx. Por otro lado, la producción de la biomasa utilizada en la caldera, según Li et al. (2021) involucra consumo eléctrico, utilización de maquinaria, uso de combustibles y además conlleva un subsistema agrícola donde se genera el aserrín ocupado como biomasa, donde también hay uso de fertilizantes, semillas, entre otros, que son fuentes potenciales para generar eutrofización.

El impacto generado por esta categoría es de un 98% con respecto a las demás, seguido desde muy lejos por el agotamiento de recursos fósiles y cambio climático con un 1% para cada una. Esto coincide con el estudio realizado por Eide (2002), donde su estudio realizado en una planta lechera dio como resultado que los procesos CIP son los mayores contribuidores al potencial de eutrofización

en toda la planta, con un 80% del total. Sin embargo, estos resultados difieren del estudio realizado por Pazouki et al. (2021), donde el aporte mayoritario de un CIP de limpieza de membranas fue el impacto de toxicidad humana, lo cual se debe a que los sistemas a lavar son distintos y las condiciones de temperatura, tiempos, químicos son específicos para cada CIP y son validados de forma empírica (Goode et al., 2013).

En relación con lo anterior, en la figura 4.7.10 y 4.7.11 se observa la comparación de los impactos finales, donde el daño al medioambiente generado principalmente por la producción de vapor en la planta es la categoría con mayor impacto, lo cual se debe al impacto provocado por la eutrofización.

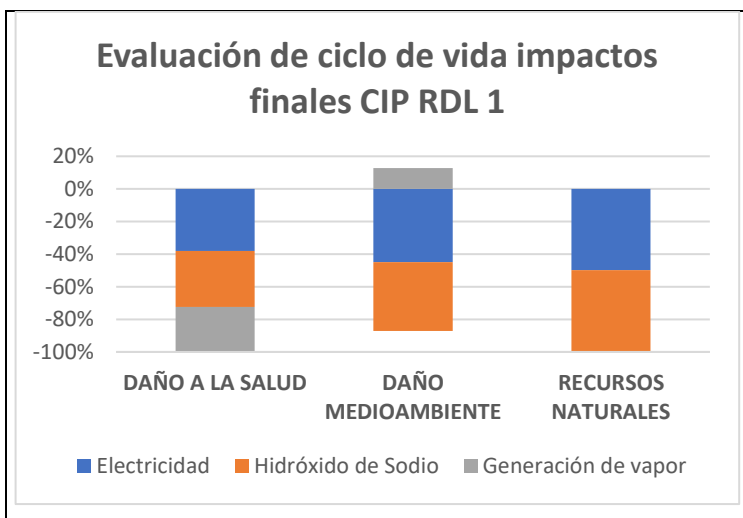


Figura 4.7.10. Impactos finales normalizados CIP RDL 1

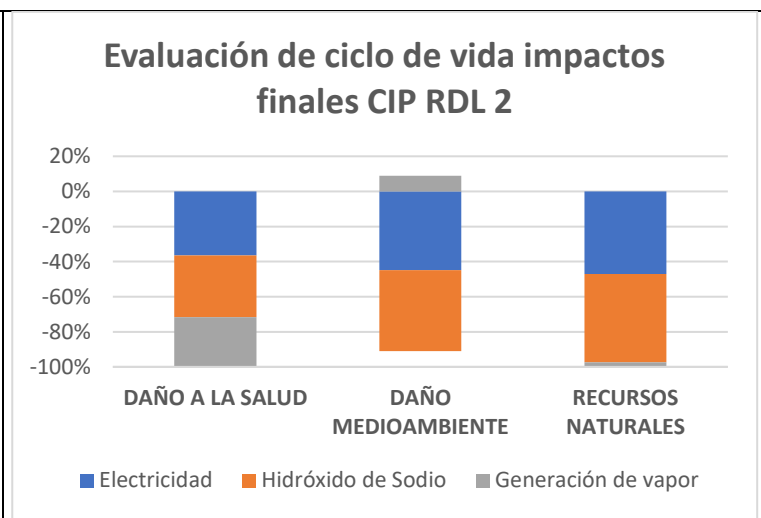


Figura 4.7.11. Impactos finales normalizados CIP RDL 2

5. Discusión de resultados

La recuperación de la solución alcalina para utilizarla en los pre-enjuagues mejora la efectividad de la etapa de limpieza y, en consecuencia, se obtiene un mejor desempeño del lavado, generando una disminución de los riesgos de contaminación microbiológica, formación de biopelículas y otros fenómenos que puedan causar un potencial riesgo a la inocuidad del producto procesado (Brasileiro et al., 2023; Kabwanga et al., 2018). Además de esto, la recuperación de la solución para utilizarla en los pre-enjuagues generó una importante reducción de gasto hídrico en el CIP, donde el ahorro total alcanzado fue de $0,6 \text{ m}^3 \text{ agua/m}^3 \text{ leche}$, lo que equivale a reducir el consumo desde $1,8 \text{ m}^3$ de agua para el procesamiento de un 1 m^3 de leche, a la utilización de $1,2 \text{ m}^3$ para el caso CIP RDL 2. Según Lima (2017) para elaborar 1 kg de queso se requieren 10 litros de leche, por lo cual, se necesitan 12 litros de agua en el CIP de recepción de leche para la producción de 1 kg de queso. En este ámbito, esto equivale a un 0,24% con respecto a los 5000 litros que señala Finnegan et al. (2018), que son necesarios para la producción de 1 kg de queso, lo cual refleja que el aporte del CIP de recepción de leche en consumo de agua es minoritario con respecto a la totalidad de la planta.

Por otro lado, analizar los tiempos de los lavados de los sistemas conduce a detectar problemas en el CIP. Por ejemplo, el camión que presenta efecto piscina se identificó al observar que este camión utilizaba 3 minutos más de tiempo que el resto de los camiones lavados en la línea. Al identificar y posteriormente solucionar estos problemas, se logra disminuir el consumo energético del CIP, lo cual, se evidencia con la reducción de $0,6 \text{ kWh}$ por m^3 de leche que se alcanzó al disminuir los tiempos de lavado como resultado de la menor concentración de soda y el mejoramiento de la inyección automática de esta solución.

Tal como se ha señalado en diferentes estudios, los sistemas CIP requieren de un alto consumo de agua, energía e insumos químicos y su utilización puede tener consecuencias sobre los ecosistemas (Goode et al., 2013; Tsai et al., 2021, Pant et al., 2023). En el CIP estudiado, el impacto mayoritario fue la eutrofización de agua dulce, la cual, se refleja en un mayor daño al medioambiente como impacto final, resultado que coincide con la evaluación de ciclo de vida realizada por Eide (2002), donde los mayores contribuyentes al potencial de eutrofización de agua dulce en una planta láctea fueron los sistemas CIP.

Sin embargo, la introducción de las mejoras asociadas a la reducción de la concentración de químicos en un 50%, requiere de una validación empírica en el CIP asociado, ya que, pese a utilizar una concentración recomendada para este tipo de sistema, cada proceso de limpieza en el lugar es distinto y depende de diversos factores como las características físicas de los equipos (Bremer et al., 2006; Goode et al., 2013).

Por otro lado, mejoras como el cambio de *spray balls* y la recuperación de condensado, son propuestas que requieren de una inversión, por lo cual, se necesita un análisis técnico-económico más detallado para su implementación, considerando que, por ejemplo, cada *spray ball* es diferente y trabajan a presiones y flujos específicos (Bénézech y Lalande ,2002; Tetra Pak, 2023).

De las medidas planteadas el 50% de estas se encuentra en periodo de implementación, correspondientes a las propuestas de recuperación de solución, ajustes de programación y de eliminación de vapor de los pre-enjuagues. Esto ha resultado en ahorros del 23% y 30% de agua y vapor respectivamente, respecto a los consumos existentes previo a la optimización propuesta.

6. Conclusiones

La permanente revisión, monitoreo y aplicación de conceptos de mejora continua de los programas de lavado de un CIP, puede generar oportunidades de ahorro importantes como las encontradas durante este estudio. Para ello analizar parámetros de tiempo, curvas de conductividad, análisis de objetivos entre otras actividades, lleva a detectar medidas de mejora. En este caso, los ahorros proyectados al año para este sistema se cuantificaron como 10.143 m³ agua, 1.308 ton vapor, 11,1 MWh y 17,4 ton de NaOH.

Estos ahorros llevan a una reducción del consumo de químicos en un 50%, el consumo de agua en un 31%, el consumo eléctrico en un 11% y el consumo de vapor en un 42%. La implementación de estas medidas requiere muchas veces de inversión y de un periodo de validación para llevarlas a cabo, sin embargo, hay otras que pueden realizarse de forma inmediata, como aquellas que requieren de un cambio de programación o la eliminación de vapor, llevando a un ahorro de 6.654 m³ agua y 796 toneladas de vapor proyectados al año.

La evaluación de desempeño ambiental del CIP demostró que las mejoras propuestas permiten reducir en 50% el potencial de eutrofización de agua dulce, que corresponde a la categoría de impacto dominante debido al efecto ambiental del consumo eléctrico. Todas las demás categorías de impacto presentan reducciones del orden del 27% como resultado de mejoras del proceso. Los resultados demuestran que las propuestas de mejoramiento impactan positivamente a la categoría de daño al medio ambiente, con menor efecto sobre el consumo de recursos naturales y el daño a la salud humana. Se concluye que las medidas de mejoramiento del CIP son técnicamente viables y reducen significativamente los potenciales impactos ambientales.

7. Referencias

- Bénézech, T.; Lalande, M. (2002). Sistemas de limpieza CIP en Leveau J.Y.; Bouix M. (Ed.), Manual técnico de higiene, limpieza y desinfección. París. 12(1). 396-419. Versión española, traducción autorizada del título *original Nettoyage, désinfection et hygiene dans les bio-industries*. Technique et documentation, AMV EDICIONES.
- Brasileiro, R. G.; Silva, L. D.; Sislian, R.; Gedraite, R. (2023). Rinse model implementation of alkaline detergent in clean-in-place process with gradual flow reduction for economy of water and effluent reduction. *Journal of Food Process Engineering*, 46(7), e14343. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14343>.
- Bremer, Philip J.; Suzanne Fillery.; A. James McQuillan. (2006). Laboratory scale Clean-In-Place (CIP) studies on the effectiveness of different caustic and acid wash steps on the removal of dairy biofilms, *International Journal of Food Microbiology*. 106, (3),2006, 254-262, ISSN 0168-1605. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.07.004>.
- Çengel, Y. (2017). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 3a. ed. 843-845. McGraw Hill. ISBN-10: 0-07-312930-5.
- Eide, M.H. (2002). Life Cycle Assessment (LCA) of industrial Milk Production. TINE Norwegian Dairies, Centre for Research and Development, P.O. Box 7 Kalbakken, N-0902 OSLO, Norway.7(2).115-126. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1065/Ica2001.12.069>.
- Eide; M.H.; Homleid J.P.; Mattsson, B. (2003). Life cycle assessment (LCA) of cleaning-in-place processes in dairies, *LWT - Food Science and Technology*.36(3). 303-314. ISSN 0023-6438. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00211-6](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00211-6).
- Fan, Mengyuan.; David M. Phinney.; Dennis R. Heldman (2015). Effectiveness of Rinse water during in-place Cleaning of stainless-Steel pipelines, *Journal of food Science*.80(7). E1490-E1497. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12914>.
- Finnegan, W.; Yan, M., Holden, N. M.; Goggins, J. (2018). A review of environmental life cycle assessment studies examining cheese production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 1773–1787. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1407-7>.
- Gallot- Lavallee, T.; Marc Lalande; Georges Corrieu. (1984). Cleaning Kinetics Modeling of Holding Tubes Fouled During Milk Pasteurization, Inra- Laboratoire de Genie Industriel Alimentaire Villeneuve D'Ascq, France, *Journal of Food Process Engineering*.7(2). 123-142. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1984.tb00642.x>.
- Generadoras eléctricas. (2022). Generación eléctrica en Chile, participación relativa por fuente de generación. Recuperado de: [Generadoras de Chile - Generación eléctrica en Chile](#).
- Goode, Kylee.; Asteriadou, Konstantia.; Robbins, P.; Fryer, P. (2013). Fouling and Cleaning Studies in the Food and Beverage Industry Classified by Cleaning Type. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*.12 122-140. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12000>.

- Hong, J.; Wei Chen.; Yutao, W.; Changqing Xu.; Xu Xu. (2014). Life cycle assessment of caustic soda production: a case study in China, *Journal of Cleaner Production*.66.113-120, ISSN 0959-6526, Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.009>.
- Huijbregts, M. A. J.; Steinmann, Z. J. N.; Elshout, P. M. F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A.; Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 22(2). 16–25. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- ISO. (2006a). Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia. (ISO 14.044:2006). Recuperado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- ISO. (2006b). Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices. (ISO 14.044:2006). Recuperado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>.
- Kabwanga, Ismail T.; Atila, Yetişemiyen.; Shakira Nankya. (2018). Dairy industrial hygiene: a review on biofilm challenges and control, *international journal of research- Granhaalayah*.6 (2).268-271. ISSN- 2350-0530(O), ISSN- 2394-3629(P). Recuperado de: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1194694>.
- Lelieveld, H.L.M.; Mostert, M.A.; J. Holah. (2005). Handbook of higiene control in the food industry. Woodhead publishing limited, Institute of Food Science and Technology. Capítulo 27, 427.
- Li, X.; Mupondwa, E.; Panigrahi, S.; Lope, T.; Phani, A. (2021). Life cycle assessment of densified wheat straw pellets in the Canadian Prairies. *Int J Life Cycle Assessment*. **17**. 420–431. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0374-7>
- Lima, J. L. (2017). Estudio de Caracterización de la Cadena de Producción y Comercialización de la Industria de Lácteos: Estructura, Agentes y Prácticas.81-82. Recuperado de: [Estudio de caracterización de la cadena de producción y comercialización de la industria de lácteos: estructura, agentes y prácticas \(odepa.gob.cl\)](http://www.odepa.gob.cl/publicaciones/estudio-de-caracterizacion-de-la-cadena-de-produccion-y-comercializacion-de-la-industria-de-lacteos-estructura-agentes-y-practicas)
- Lozano Miralles, J.A.; López García, R.; Palomar Carnicero, J.M.; Rey Martínez, F.J. (2020). Comparative study of heat pump system and biomass boiler system to a tertiary building using the Life Cycle Assessment (LCA), *Renewable Energy*.152. 1439-1450. ISSN 0960-1481. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.148>.
- Lyndgaard, C.B.; Morten A.R.; Søren B.E.; Dorrit T.; Frans van den Berg. (2014). Moving from recipe-driven to measurement-based cleaning procedures: Monitoring the Cleaning-In-Place process of whey filtration units by ultraviolet spectroscopy and chemometrics, *Journal of Food Engineering*.126.82-88. ISSN 0260-8774. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.037>.
- Palabiyik, I.; Mustafa, T.Y.; Fryer, P.J.; Robbins P.T.; Toker, O.S. (2015). Minimising the environmental footprint of industrial-scaled cleaning processes by optimisation of a novel clean-in-place system protocol, *Journal of Cleaner Production*.108 (A). 1009-1018. ISSN 0959-6526. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.114>.

- Pant, K. J.; Cotter, P. D.; Wilkinson, M. G.; Sheehan, J. J. (2023). Towards sustainable Cleaning-in-Place (CIP) in dairy processing: Exploring enzyme-based approaches to cleaning in the Cheese industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 1–18. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13206>
- Pazouki, P.; Hangyong, R.L.; Ali El Hanandeh.; Wahidul, B.; Edoardo, B.; Fernanda, H.; Rodney, A. S. (2021). Comparative environmental life cycle assessment of alternative osmotic and mixing dilution desalination system configurations, *Desalination*. 504.114963. 2-11. ISSN 0011-9164. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114963>
- Piepiórka-Stepuk, J.; Jarosław, D.; Monika, S.; Tomasz, K.; Marek, J. (2021). Mathematical modeling and analysis of the interaction of parameters in the clean-in-place procedure during the pre-rinsing stage, *Journal of Cleaner Production*.297.126484. 2-10. ISSN 0959-6526. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126484>.
- Smith, J.M.; Van Ness, H. C.; Abott. M. M.; Swihart M. T. (2005). Introduction to chemical engineering thermodynamics. 8a. ed. 687-693. Mc Graw Hill.
- Tetra Pak. (2023). Premium tank cleaning equipment reduces water and energy use while cutting cleaning time. Recuperado de: <https://www.tetrapak.com/content/dam/tetrapak/media-box/global/en/gated/services/tetra-pak-plant-components-processing/tetra-pak-plant-components/documents/tps-tank-cleaning-one-pager-v2.pdf>
- Thomas, A.; Sathian, C.T. (2014). Cleaning-In-Place (CIP) System in Dairy Plant – Review. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*.8(6).41-44. (IOSR-JESTFT) e-ISSN: 2319-2402, p- ISSN: 2319-2399 Recuperado de: DOI: 10.9790/2402-08634144.
- Tsai, Jheng-Han.; Jen-Yi H. D.; Ian Wilson. (2021). Life cycle assessment of cleaning-in-place operations in egg yolk powder production, *Journal of Cleaner Production*. 278.123936. 2-10. ISSN 0959-6526. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123936>.
- Wang, H.; Linlin, C.; Yunhan, L.i.; Xinglian, Xu.; Guanghong, Z. (2018). Biofilm formation by meat-borne *Pseudomonas fluorescens* on stainless steel and its resistance to disinfectants, *Food Control*. 91. 397-403. ISSN 0956-7135. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.04.03>

8. Anexos

Anexo A: Base de cálculo inventario de ciclo de vida

Para ambos escenarios el inventario fue calculado de manera anual, tanto para la determinación del consumo actual del CIP y el consumo ligado a la implementación de las oportunidades de ahorro detectadas, donde la base de cálculo se dividió para los lavados diarios y semanales, la cuál fue la que se expone en la tabla A.1:

Tabla A.1. Base de cálculo para lavados soda (diarios) y lavados soda/ácido (semanales). (Elaboración propia).

Objetivos	Línea	Lavado Soda / día	Lavados Soda-ácido/ semana
Camiones	1 y 3	40	40
Silos/estanques	2	7	10
Líneas de Descarga	1 y 3	2	2

En base a esto, para calcular consumos se necesitaron los flujos utilizados para lavar los objetivos, los cuales se ilustran en la tabla A.2:

Tabla A.2. Flujos utilizados por objetivo. (Elaboración propia).

Objetivos	Flujo (L/h)
Camiones	20.000
Silos/estanques	15.000
Líneas de Descarga	40.000

Esta corresponde a la base de cálculo general para los cuatro ítems de consumo, vapor, agua, químicos y energía, en el Anexo B se ilustran los resultados de los consumos y los requerimientos de información particular para cada categoría.

Anexo B: Determinación de consumos CIP RDL

- **Determinación de consumo de agua:**

Para cuantificar el consumo de agua del CIP, fue necesario contar con el flujo utilizado para enjuagar cada objetivo, ilustrado en la tabla A.2 y el tiempo de los enjuagues finales e intermedios. En la tabla B.1 se muestran los resultados de consumos anuales para los enjuagues finales y en la tabla B.2 para enjuagues intermedios.

Tabla B.1. Consumo de agua enjuagues finales. (Elaboración propia).

Objetivo	Tiempo (s)	Consumo (L)	Consumo/mes (m³)	Consumo/año (m³)
Camiones	100	1.111	1.333	16.000
Silos y estanques	180	750	135	1.890
Línea Descarga	180	2.000	180	1.440
TOTAL				19.330

Tabla B.2. Consumo de agua enjuagues intermedios. (Elaboración propia).

Objetivo	Tiempo (s)	Consumo (L)	Consumo/mes (m³)	Consumo/año (m³)
Camiones (L1)	180	2.000	160	1.920
Camiones (L3)	100	1.111	89	1.067
Silos y estanques	60	250	9	120
Línea Descarga	180	2.000	24	192
TOTAL				3.299

El consumo total del CIP de recepción de leche corresponde a 22.629 m³ sin embargo se detectaron consumos extra de agua los cuales están cuantificados como oportunidades de ahorro con los números 1, 2, 4 y 6. Estos consumos se le deben adicionar a los 22.629 m³ encontrados para dar el consumo actual de agua en el CIP.

- **Determinación del consumo energético:**

Para la estimación del consumo energético, para la simplificación de los cálculos se agruparon los lavados diarios de silos/estanques con los de las líneas, ya que, el tiempo de lavado es similar y se utilizan las mismas bombas. En la tabla B.3, la duración de los tiempos de los lavados para la cuantificación del consumo energético del proceso:

Tabla B.3. Tiempo anual ocupado en lavados. (Elaboración propia).

Objetivos	Tiempo promedio de lavado (s)	Objetivos diarios Línea A y C	Tiempo usado en lavados al día (h)	Tiempo en lavados al año (h)
Camiones	960	40	10,7	3.893
Silos/ estanques y líneas	1.620	9	4,05	1.478

Tabla B.4. Consumo energético del CIP de recepción de leche. (Elaboración propia).

Objetivos	Potencia bomba retorno CIP (kW)	Potencia bomba alimentación CIP (kW)	Consumo operacional al año (kWh)
Camiones	7,5	11	72.027
Silos y estanques	7,5	11	27.348
TOTAL			99.374

Para este consumo energético calculado, se le suma el consumo energético extra asociado a cuatro objetivos que consumían un tiempo mayor en los lavados, los cuales fueron identificados y cuantificados en la oportunidad de ahorro 10 .

- **Determinación del consumo de vapor:**

Para cuantificar el vapor utilizado en el CIP de recepción, se calculó la masa de vapor necesaria para calentar la solución de agua y detergente en un delta de temperatura. Para esto, se utilizaron los parámetros expuestos en la tabla B.5 para el vapor utilizado en la recirculación de soda y se obtuvieron los resultados expuestos en la misma tabla.

Tabla B.5. Consumo de vapor en recirculación de Soda. (Elaboración propia).

Parámetro	Camiones L1 y L3	Silos y estanques	Líneas de descarga
Flujo(L/min)	333	250	666
Delta T° (°C)	20	20	20
Cp Agua (kJ/kg °C)	4,2	4,2	4,2
Entalpía vapor saturado 4 bar (kJ/kg)	2.134	2.134	2.134
Vapor (kg/h)	783	591	1.575
Objetivos/día	40	7	2
Tiempo (min)	5	10	30
Vapor (ton/año)	479	255	575
Vapor TOTAL (Ton/año)	1.788		

Las propiedades termodinámicas del vapor saturado a 4 bar fueron extraídas desde (Çengel, Y., 2007; Smith et al., 2005) y de esta misma forma se calculó el vapor utilizado en los pre-enjuagues y enjuagues intermedios. Este mismo procedimiento fue utilizado para cuantificar los ahorros en vapor.

- **Determinación del consumo de químicos:**

Este consumo fue calculado mediante un tiempo de dilución, por lo que se consideró que en este tiempo la soda a la concentración dada se diluye y va a drenaje. El consumo actual y el proyectado se muestran en la tabla B.6, donde en este caso, también se agruparon las líneas con los silos y estanques por simplificación.

Tabla B.6. Consumo de NaOH al 1% en el CIP RDL. (Elaboración propia).

<i>CIP RDL 1</i>	<i>Tiempo dilución</i>	<i>Concentración %V/v</i>	<i>Pérdidas Soda/lavado</i>	<i>SODA MENSUAL</i>	<i>SODA anual (KG)</i>
Camiones	60 s	1,0%	1,7kg	2.267 kg	27.200
Silos / estanques y líneas	100 s	1,0%	2,1kg	638 kg	7.650

Cálculo de oportunidades de ahorro:

1. Recuperación de solución desde 20 a 5 mS con destino a drenaje (Agua):

Tabla B.7. Recuperación de solución de 20 a 5 mS por todos los objetivos. (Elaboración propia).

Recuperación de 30 segundos de solución alcalina diluida			
Número de objetivos diarios	Cantidad de lavados diarios al mes	Pérdidas por lavado	Recuperación anual
49	30	166 L	2.931 m3

2. Recuperación de solución a drenaje por generación de espuma (Agua):

Al generarse presencia de espuma en el estanque de soda, el estanque marca nivel máximo durante la

Tabla B.8. Recuperación de solución por generación de espuma. (Elaboración propia).

Recuperación de 47 segundos de solución alcalina			
Número de objetivos línea 1 y 3	Días al mes con aparición de espuma	Pérdidas por lavado	Recuperación anual
40	22,5	261 L	2.820 m3
Número de objetivos línea 2	Días al mes con aparición de espuma	Pérdidas por lavado	Recuperación anual
9	22,5	196 L	476 m3
Frecuencia de aparición de espuma en lavados	75%	TOTAL (m3)	3.296

3. Ajuste de la programación de enjuagues intermedios líneas 1 y 3 (Agua):

Tabla B.9. Ajuste de programación línea A, reducción del tiempo de enjuague intermedio. (Elaboración propia).

Consumo de agua por enjuague intermedio línea 1		
Línea 1 RDL 1 (L)	Línea1 RDL 2 (L)	Ahorro (m3)
1.000	555	427
Camiones	Silos y Estanques	
20	20	

4. Identificación de efecto piscina en camión lechero (Agua):

Tabla B.10. Consumo extra de camión por efecto piscina. (Elaboración propia).

Consumo extra de agua por lavado con relación al promedio de otros camiones	Lavados/mes	Consumo extra mensual (L)	Consumo extra anual (m3)
951 L	75	71.325	856

5. Proposición de cambio de spray balls (Agua):

Tabla B.11. Consumo extra de de spray balls estáticas en comparación a orbitales. (Elaboración propia).

Spray balls estáticas		
Parámetros	Enjuagues finales	Enjuagues intermedios
Silos diarios	6	6
lavados mes	30	4
Flujo (L/h)	15.000	15.000
Agua por lavado (L)	750	250
Agua anual (m3)	1.620	72
Ahorro spray balls orbitales 50% (m3)		846

6. Proposición de retorno de condensado (Agua y vapor):

El retorno de condensado es igual al consumo de vapor calculado B.5, recuperando 1.788 toneladas de vapor al año, sin embargo, para cuantificar la recuperación de calor en la caldera se utilizó la entalpía del líquido a 4 bar y la del vapor a la misma temperatura (Çengel , 2007; Smith et al., 2005).

Tabla B.12. Ahorro de vapor al recuperar condensado. (Elaboración propia).

Recuperación de condensado a 4 bar	
TOTAL (ton/año)	1.788
Entalpía del líquido a 4 bar (kJ/kg)	600
Ahorro energía (kJ)	1.072.657
Entalpía vapor a 11 bar (kJ/kg)	2.750
Ahorro vapor anual (tonV)	390

7. Eliminación del vapor utilizado en pre-enjuagues y enjuagues intermedios (Vapor):

Tabla B.13. Ahorro de vapor en pre-enjuagues. (Elaboración propia).

Ahorro de vapor Línea 1 y 3 (4 bar)			Ahorro de vapor línea 2 (4 bar)		
Set point T°	Q actual (kJ)	Masa calentada (kg)	Set point T°	Q actual (kJ)	Masa calentada (kg)
36	87.780	1.000	36	65.835	750
Ahorro vap (kJ)	Entalpía vap (kj/kg)	Vapor (kg)	Ahorro vap (kJ)	Entalpía vap (kj/kg)	Vapor (kg)
87.780	2.134	41	65.835	2134	31
Pre-enjuagues diarios	Vapor anual (ton)		Pre-enjuagues diarios	Vapor anual (ton)	
40	601		9	101	

Tabla B.14. Ahorro de vapor en enjuagues intermedios (Elaboración propia).

Ahorro de vapor línea 1 (4 bar)			Ahorro de vapor línea 2 (4 bar)			Ahorro de vapor línea 3 (4 bar)		
Set point T°	Q actual (kJ)	Masa calentada (kg)	Set point T°	Q actual (kJ)	Masa calentada (kg)	Set point T°	Q actual (kJ)	Masa calentada (kg)
36	87.780	1.000	36	37.620	250	36	83.600	556
Ahorro vapor (kJ)	Entalpía vapor (kj/kg)	Vapor (kg)	Ahorro vapor (kJ)	Entalpía vapor (kj/kg)	Vapor (kg)	Ahorro vapor (kJ)	Entalpía vapor (kj/kg)	Vapor (kg)
87.780	2.134	41	37.620	2.134	18	83.600	2134	39
Enjuagues semana	Vapor anual (ton)		Enjuagues semana	Vapor anual (ton)		Enjuagues semana	Vapor anual (ton)	
20	40		20	17		20	38	

8. Proposición de calentamiento de soda 5 ° C bajo la temperatura actual (Vapor):

Tabla B.15. Ahorro de vapor en recirculación soda (Elaboración propia).

SET POINT MENOR TEMPERATURA								
LÍNEA 1 Y 3								
Actual	Propuesto	Presión Vapor (bar)	Entalpía (kJ/kg)	Volumen Recirculado (L)	Objetivos/día	Ahorro calor por lavado (kJ)	Ahorro de vapor (kg)	ANUAL VAPOR (TONV)
70	65	4	2.134	667	40	13.933	6,5	95
LÍNEA 2								
Actual	Propuesto	Presión Vapor (bar)	Entalpía (kJ/kg)	Volumen Recirculado	Objetivos/día	Ahorro calor por lavado (kJ)	Ahorro de vapor (kg)	ANUAL VAPOR (TONV)
70	65	4	2.134	833	9	17.417	8,2	27

9. Recirculación de soda a menor conductividad (químicos y consumo energético):

Tabla B.16. Consumo proyectado de NaOH al 0,5% en el CIP RDL. (Elaboración propia).

CIP RDL 2	Tiempo dilución	Concentración %V/v	Pérdidas Soda/lavado	SODA mensual (kg)	SODA anual (kg)
Camiones	60 s	0,5%	0,8kg	1.133	13.600
Silos / estanques y líneas	100 s	0,5%	1,0kg	319	3.825

Tabla B.17. Reducción de consumo proyectado por menor conductividad de soda. (Elaboración propia).

Tiempo extra (promedio) por lavados de 10 mS de diferencia (s)	Objetivos diarios Línea 1 y 3	Tiempo extra al día (h)
94	40	1,04
Potencia bomba retorno (kW)	Número de bombas	Consumo operacional (kWh)
7,5	1	2.859
Potencia bomba salida CIP (kW)	Número de bombas	Consumo operacional (kWh)
11	1	4.193
Tiempo extra (promedio) por lavados de 10 mS de diferencia (s)	Objetivos diarios Línea 2	Tiempo extra al día (h)
180	9	0,45
Potencia bomba retorno (kW)	Número de bombas	Consumo operacional (kWh)
7,5	1	1.232
Potencia bomba salida CIP (kW)	Número de bombas	Consumo operacional (kWh)
11	1	1.807

10. Optimización de la inyección automática de soda (consumo energético):

Tabla B.18. Ahorro operacional al introducir inyección automática de soda. (Elaboración propia).

Tiempo extra (promedio) por no inyección	Objetivos semana	Tiempo extra al mes
1.020	4	4,5
Potencia bomba retorno (kW)	Número de bombas	Consumo operacional anual (kWh)
7,5	1	408
Potencia bomba salida CIP (kW)	Número de bombas	Consumo operacional anual (kWh)
11	1	598

Anexo C: Impactos intermedios y normalizados SEN

Tabla C.1: Impactos intermedios generación eléctrica en Chile. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad/ kWh	Total
Cambio climático	kg CO2 eq	$3,7 \times 10^{-1}$
Agotamiento de capa de ozono	kg CFC- 11 eq	$1,4 \times 10^{-8}$
Acidificación	kg SO2 eq	$2,5 \times 10^{-3}$
Eutrofización agua dulce	kg P eq	$2,4 \times 10^{-4}$
Eutrofización marina	kg N eq	$1,2 \times 10^{-4}$
Toxicidad humana	kg 1,4- DB eq	$8,1 \times 10^0$
Oxidación fotoquímica	kg NMVOC	$1,8 \times 10^{-3}$
Formación de material particulado	kg PM10 eq	$4,8 \times 10^{-3}$
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4- DB eq	$2,6 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad agua dulce	kg 1,4- DB eq	$1,1 \times 10^{-2}$
Ecotoxicidad marina	kg 1,4- DB eq	$8,4 \times 10^0$
Radiación	kBq U235 eq	$3,9 \times 10^{-3}$
Uso de suelo (agricultura)	m2a	$3,6 \times 10^{-2}$
Uso de suelo (urbano)	m2a	$1,4 \times 10^{-2}$
Transformación del suelo	m2	$3,5 \times 10^{-5}$
Uso de agua	m3	$8,2 \times 10^{-3}$
Agotamiento de metales	kg Fe eq	$1,3 \times 10^{-2}$
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	$1,1 \times 10^{-1}$

Tabla C.2: Impactos normalizados generación eléctrica en Chile. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Total
Cambio climático	$3,8 \times 10^{-5}$
Agotamiento de capa de ozono	$6,5 \times 10^{-7}$
Acidificación	$6,4 \times 10^{-5}$
Eutrofización agua dulce	$5,8 \times 10^{-4}$
Eutrofización marina	$1,1 \times 10^{-5}$
Toxicidad humana	$1,8 \times 10^{-3}$
Oxidación fotoquímica	$3,1 \times 10^{-5}$
Formación de material particulado	$3,2 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad terrestre	$1,8 \times 10^{-5}$
Ecotoxicidad agua dulce	$9,4 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad marina	$3,3 \times 10^{-3}$
Radiación	$6,2 \times 10^{-7}$
Uso de suelo (agricultura)	$7,9 \times 10^{-6}$
Uso de suelo (urbano)	$3,4 \times 10^{-5}$
Transformación del suelo	$2,1 \times 10^{-4}$
Uso de agua	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de metales	$1,9 \times 10^{-5}$
Agotamiento de recursos fósiles	$7,0 \times 10^{-5}$

Anexo D: Impactos intermedios y normalizados hidróxido de sodio

Tabla D.1: Impactos intermedios producción de hidróxido de sodio al 50%. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad/ kg NaOH	Total
Cambio climático	kg CO2 eq	$7,4 \times 10^{-1}$
Agotamiento de capa de ozono	kg CFC- 11 eq	$7,8 \times 10^{-7}$
Acidificación	kg SO2 eq	$5,1 \times 10^{-3}$
Eutrofización agua dulce	kg P eq	$5,0 \times 10^{-4}$
Eutrofización marina	kg N eq	$3,0 \times 10^{-4}$
Toxicidad humana	kg 1,4- DB eq	$2,2 \times 10^1$
Oxidación fotoquímica	kg NMVOC	$3,4 \times 10^{-3}$
Formación de material particulado	kg PM10 eq	$7,1 \times 10^{-3}$
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4- DB eq	$9,7 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad agua dulce	kg 1,4- DB eq	$5,5 \times 10^{-2}$
Ecotoxicidad marina	kg 1,4- DB eq	$3,0 \times 10^1$
Radiación	kBq U235 eq	$3,8 \times 10^{-2}$
Uso de suelo (agricultura)	m2a	$7,7 \times 10^{-2}$
Uso de suelo (urbano)	m2a	$2,5 \times 10^{-2}$
Transformación del suelo	m2	$1,0 \times 10^{-4}$
Uso de agua	m3	$3,3 \times 10^{-2}$
Agotamiento de metales	kg Fe eq	$1,2 \times 10^{-1}$
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	$2,1 \times 10^{-1}$

Tabla D.2. Impactos normalizados producción de hidróxido de sodio al 50%. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Total
Cambio climático	$7,7 \times 10^{-5}$
Agotamiento de capa de ozono	$3,5 \times 10^{-5}$
Acidificación	$1,3 \times 10^{-4}$
Eutrofización agua dulce	$1,2 \times 10^{-3}$
Eutrofización marina	$3,0 \times 10^{-5}$
Toxicidad humana	$4,8 \times 10^{-3}$
Oxidación fotoquímica	$6,0 \times 10^{-5}$
Formación de material particulado	$4,8 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad terrestre	$6,9 \times 10^{-5}$
Ecotoxicidad agua dulce	$4,7 \times 10^{-3}$
Ecotoxicidad marina	$1,2 \times 10^{-2}$
Radiación	$6,2 \times 10^{-6}$
Uso de suelo (agricultura)	$1,7 \times 10^{-5}$
Uso de suelo (urbano)	$6,2 \times 10^{-5}$
Transformación del suelo	$6,3 \times 10^{-4}$
Uso de agua	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de metales	$1,6 \times 10^{-4}$
Agotamiento de recursos fósiles	$1,4 \times 10^{-4}$

Anexo E: Impactos intermedios y normalizados Boiler caldera de biomasa

Tabla E.1. Impactos intermedios generación de vapor en caldera de biomasa. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad/ MJ	Total
Cambio climático	kg CO2 eq	$2,7 \times 10^{-3}$
Agotamiento de capa de ozono	kg CFC- 11 eq	$1,4 \times 10^{-8}$
Acidificación	kg SO2 eq	$1,3 \times 10^{-4}$
Eutrofización agua dulce	kg P eq	$0,0 \times 10^0$
Eutrofización marina	kg N eq	$5,6 \times 10^{-6}$
Toxicidad humana	kg 1,4- DB eq	$2,5 \times 10^{-1}$
Oxidación fotoquímica	kg NMVOC	$1,6 \times 10^{-4}$
Formación de material particulado	kg PM10 eq	$2,6 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4- DB eq	$6,9 \times 10^{-6}$
Ecotoxicidad agua dulce	kg 1,4- DB eq	$1,2 \times 10^{-5}$
Ecotoxicidad marina	kg 1,4- DB eq	$4,0 \times 10^{-2}$
Radiación	kBq U235 eq	$0,0 \times 10^0$
Uso de suelo (agricultura)	m2a	$0,0 \times 10^0$
Uso de suelo (urbano)	m2a	$0,0 \times 10^0$
Transformación del suelo	m2	$0,0 \times 10^0$
Uso de agua	m3	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de metales	kg Fe eq	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	$1,9 \times 10^{-3}$

Tabla E.2. Impactos normalizados generación de vapor en caldera de biomasa. (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Total
Cambio climático	$2,7 \times 10^{-7}$
Agotamiento de capa de ozono	$6,6 \times 10^{-7}$
Acidificación	$3,3 \times 10^{-6}$
Eutrofización agua dulce	$0,0 \times 10^0$
Eutrofización marina	$5,5 \times 10^{-7}$
Toxicidad humana	$5,6 \times 10^{-5}$
Oxidación fotoquímica	$2,8 \times 10^{-6}$
Formación de material particulado	$1,7 \times 10^{-5}$
Ecotoxicidad terrestre	$4,9 \times 10^{-7}$
Ecotoxicidad agua dulce	$1,0 \times 10^{-6}$
Ecotoxicidad marina	$1,6 \times 10^{-5}$
Radiación	$0,0 \times 10^0$
Uso de suelo (agricultura)	$0,0 \times 10^0$
Uso de suelo (urbano)	$0,0 \times 10^0$
Transformación del suelo	$0,0 \times 10^0$
Uso de agua	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de metales	$0,0 \times 10^0$
Agotamiento de recursos fósiles	$1,2 \times 10^{-6}$

Anexo F: Impactos CIP RDL 1.

Tabla F.1. Contribución por insumo a las categorías de impacto intermedios en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).

CIP RDL 1 Impactos intermedios	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	TOTAL	Unidad/ m ³ leche
Cambio climático	2,0E+00	1,4E+00	1,3E-04	3,4E+00	kg CO2 eq
Agotamiento de capa de ozono	7,9E-08	1,5E-06	3,1E-04	3,1E-04	kg CFC-11 eq
Acidificación	1,3E-02	9,6E-03	1,6E-03	2,5E-02	kg SO2 eq
Toxicidad humana	4,5E+01	9,5E-04	0,0E+00	4,5E+01	kg 1,4-DB eq
Eutrofización agua dulce	1,3E-03	4,1E+01	2,6E-02	4,1E+01	kg P eq
Oxidación fotoquímica	9,8E-03	6,5E-03	1,3E-03	1,8E-02	kg NMVOC
Formación de material particulado	2,6E-02	1,3E-02	8,1E-03	4,8E-02	kg PM10 eq
Uso de agua	4,5E-02	6,2E-02	0,0E+00	1,1E-01	m ³
Agotamiento de metales	7,4E-02	2,2E-01	0,0E+00	3,0E-01	kg Fe eq
Agotamiento de recursos fósiles	6,0E-01	4,0E-01	5,6E-04	1,0E+00	kg oil eq

Tabla F.2. Contribución por insumo a las categorías de impactos final en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).

CIP RDL 1 Impactos finales	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	Total
DAÑO A LA SALUD	1,7E-04	9,9E-06	5,3E-06	1,8E-04
DAÑO MEDIOAMBIENTE	1,2E-08	2,5E-05	1,7E-08	2,5E-05
RECURSOS NATURALES	2,9E-01	2,4E-01	2,6E-04	5,3E-01

Tabla F.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).

CIP RDL 1 Impactos normalizados	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	Total
Cambio climático	2,1E-04	1,5E-04	1,2E+00	1,2E+00
Agotamiento de capa de ozono	3,6E-06	6,7E-05	6,8E-06	7,8E-05
Acidificación	3,5E-04	2,5E-04	6,0E-02	6,1E-02
Toxicidad humana	1,0E-02	2,3E-03	0,0E+00	1,2E-02
Eutrofización agua dulce	3,2E-03	9,2E-03	1,2E+02	1,2E+02
Oxidación fotoquímica	1,7E-04	1,1E-04	7,5E-02	7,5E-02
Formación de material particulado	1,8E-03	9,0E-04	1,2E-01	1,2E-01
Uso de agua	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Agotamiento de metales	1,0E-04	3,1E-04	0,0E+00	4,2E-04
Agotamiento de recursos fósiles	3,9E-04	2,6E-04	8,7E-01	8,7E-01

Tabla F.4. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 1. (Elaboración propia).

CIP RDL 1 Impactos finales normalizados	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	Total
DAÑO A LA SALUD	1,1E-06	6,1E-07	7,7E-05	7,9E-05
DAÑO MEDIOAMBIENTE	2,0E-09	5,7E-09	7,1E-05	7,1E-05
RECURSOS NATURALES	2,0E-04	1,9E-04	4,0E-01	4,0E-01

Anexo G: Impactos CIP RDL 2.

Tabla G.1. Contribución por insumo a las categorías de impactos intermedios en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).

CIP RDL 2 Impactos intermedios	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	TOTAL	Unidad/ m³ leche
Cambio climático	1,8E+00	7,1E-01	7,4E-05	2,5E+00	kg CO2 eq
Agotamiento de capa de ozono	7,0E-08	7,5E-07	1,8E-04	1,8E-04	kg CFC-11 eq
Acidificación	1,2E-02	4,9E-03	9,0E-04	1,8E-02	kg SO2 eq
Toxicidad humana	4,0E+01	4,8E-04	0,0E+00	4,0E+01	kg 1,4-DB eq
Eutrofización agua dulce	1,2E-03	2,1E+01	1,5E-02	2,1E+01	kg P eq
Oxidación fotoquímica	8,7E-03	3,3E-03	7,6E-04	1,3E-02	kg NMVOC
Formación de material particulado	2,3E-02	6,8E-03	4,6E-03	3,5E-02	kg PM10 eq
Uso de agua	4,0E-02	3,1E-02	0,0E+00	7,2E-02	m3
Agotamiento de metales	6,6E-02	1,1E-01	0,0E+00	1,8E-01	kg Fe eq
Agotamiento de recursos fósiles	5,4E-01	2,0E-01	3,2E-04	7,4E-01	kg oil eq

Tabla G.2. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).

CIP RDL 2 Impactos finales	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	TOTAL
DAÑO A LA SALUD	1,5E-04	5,0E-06	3,0E-06	1,6E-04
DAÑO MEDIOAMBIENTE	1,0E-08	1,3E-05	9,5E-09	1,3E-05
RECURSOS NATURALES	2,6E-01	1,2E-01	1,5E-04	3,8E-01

Tabla G.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).

CIP RDL 2 Impactos normalizados	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	Total
Cambio climático	1,9E-04	7,3E-05	7,2E-01	7,2E-01
Agotamiento de capa de ozono	3,2E-06	3,4E-05	3,9E-06	4,1E-05
Acidificación	3,1E-04	1,3E-04	3,5E-02	3,5E-02
Toxicidad humana	8,9E-03	1,2E-03	0,0E+00	1,0E-02
Eutrofización agua dulce	2,8E-03	4,6E-03	6,7E+01	6,7E+01
Oxidación fotoquímica	1,5E-04	5,8E-05	4,3E-02	4,3E-02
Formación de material particulado	1,6E-03	4,6E-04	6,9E-02	7,1E-02
Uso de agua	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Agotamiento de metales	9,2E-05	1,6E-04	0,0E+00	2,5E-04
Agotamiento de recursos fósiles	3,4E-04	1,3E-04	5,0E-01	5,0E-01

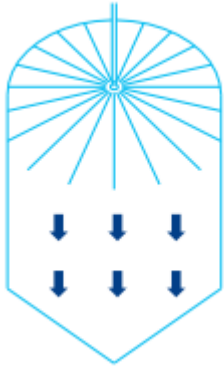
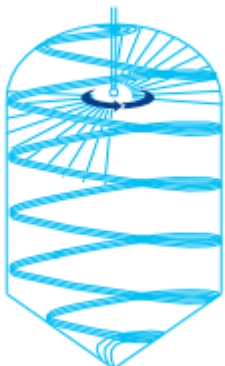
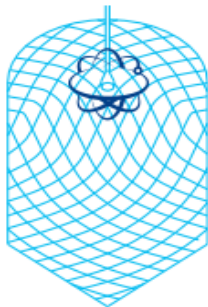
Tabla G.3. Contribución por insumo a las categorías de impactos finales normalizados en el CIP de recepción de leche RDL 2. (Elaboración propia).

CIP RDL 2 Impactos finales normalizados	Electricidad	Hidróxido de Sodio	Generación de vapor	TOTAL
DAÑO A LA SALUD	1,0E-06	3,1E-07	4,4E-05	4,6E-05
DAÑO MEDIOAMBIENTE	1,8E-09	2,9E-09	4,1E-05	4,1E-05
RECURSOS NATURALES	1,8E-04	9,6E-05	2,3E-01	2,3E-01

Anexo H: *Spray balls*

Son utilizadas en la limpieza de estanques para prevenir contaminación. Se colocan en la parte superior de estanques horizontales y/o verticales y funcionan a un flujo y presión característica para cada tipo o modelo empleado (Tetra Pak, 2023). Los modelos se presentan a continuación en la tabla H.1:

Tabla H.1: Tipos de Spray ball, modelos e información de (Tetra Pak, 2023). (Elaboración propia)

<i>Spray ball</i> estática	<i>Spray ball</i> rotatoria	<i>Spray ball</i> orbital
<p>Una ducha fija en la cual el flujo presurizado se dirige a las paredes del estanque y cae en cascada limpiando por gravedad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliza mayor cantidad de agua. 	<p>Un dispositivo con ranuras en la cual el flujo presurizado se dirige a las paredes del estanque a través de un giro en 180°.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliza 30% menos de agua que las estáticas. 	<p>Un dispositivo en la cual el flujo presurizado cubre el estanque con un giro en 360°.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliza 50% menos de agua que las estáticas.
 <p>Figura H.2. patrón de limpieza ducha estática (Fuente: Tetra Pak, 2023)</p>	 <p>Figura H.2. patrón de limpieza ducha rotatoria (Fuente: Tetra Pak, 2023)</p>	 <p>Figura H.3, patrón de limpieza ducha rotatoria (Fuente: Tetra Pak, 2023)</p>