



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

REDUCCIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA DE SEPARACIÓN Y LICUACIÓN DE  
GASES MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

NATALIA ELIZABETH SOTO REDEL

PROFESOR GUÍA

FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

FRANCISCO GRACIA CAROCA

GABRIELA ZÚÑIGA POBLETE

SANTIAGO DE CHILE

2017

REDUCCIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA DE SEPARACIÓN Y LICUACIÓN DE GASES  
MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de origen antropogénico, principalmente de la industrialización, es señalada como causal del cambio climático. Esta situación ha impactado en la temperatura del planeta y en la disponibilidad de recursos, como el agua. Es esto surge la necesidad de cuantificar el impacto ambiental de actividades humanas, para buscar medidas que permitan disminuir sus efectos negativos.

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto ambiental de una planta de separación y licuación de gases, estudiando indicadores como huella de carbono y huella hídrica del proceso mediante Análisis de Ciclo de Vida. Se estudian alternativas que permitan reducir el impacto ambiental de la planta, entregando una sugerencia de cambios a la empresa.

Para el caso basal, se considera una unidad funcional de 1.000 toneladas de producto líquido, en relación a la producción de nitrógeno, oxígeno y argón líquido. Además, se evalúa el impacto ambiental del proceso y de la distribución de productos, actividades principales de la empresa.

Se obtuvo que la huella de carbono de la unidad funcional corresponde a 1.315 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y la huella hídrica corresponde a 34.730 m<sup>3</sup> de agua dulce. Se puede concluir que la variable que más impacta ambientalmente es la electricidad utilizada, y por esta razón, las alternativas están enfocadas principalmente en la disminución de su uso.

Se evaluaron escenarios para sugerir un set de cambios a la empresa, concluyendo que las alternativas con mayor potencial de disminución de impacto ambiental corresponden a incorporar energía a partir de paneles fotovoltaicos, cambio de compresores por modelos contemporáneos y uso de nitrógeno líquido como refrigerante. En conjunto, las medidas permitirían disminuir la huella de carbono en un 19,4% y la huella hídrica en un 18,6%, y requieren una inversión de 2.335 MUSD.

La mayoría de las alternativas se desarrollaron mediante análisis de datos de la planta en estudio. Sin embargo, algunas tienen más incertidumbre debido a la falta de información, como el uso de nitrógeno líquido como refrigerante. En este caso, se sugiere realizar un segundo análisis para verificar la factibilidad de la alternativa. Además, se recomienda realizar un análisis económico más detallado, incorporando el beneficio que trae la implementación de las alternativas y los costos operacionales correspondientes.

Para finalizar, se hace hincapié en la importancia de disminuir la huella de carbono por sobre la huella hídrica, debido al impacto de la empresa y a las proyecciones locales de impacto ambiental de ambos indicadores. No obstante, una reducción de consumo eléctrico en la empresa ayudaría a disminuir el impacto ambiental de esta, tanto huella de carbono como hídrica.

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Mariana y Ricardo, por haberme dado las bases de lo que hoy soy. Ellos me enseñaron valores y me inculcaron que todo se puede con esfuerzo. Me apoyaron durante los momentos difíciles de esta carrera universitaria, como el plan común y el estrés de pruebas e informes, confiaron en mí y me amaron incondicionalmente. Particularmente, quiero agradecer a mi mamá, por haberme apoyado en mi educación desde pequeña y porque sin su esfuerzo este camino habría sido recorrido de otra forma, y a mi papá por enseñarme que siempre se puede.

Quiero agradecer a Marcelo, por haber sido mi mejor amigo durante este proceso universitario. Por haber aguantado mis momentos de locura, por aconsejarme, por preocuparte de mí, por haber sido mi primer amigo de carrera, por ayudarme a estudiar, por estar. Gracias por esas conversaciones, por los buenos momentos y por el cariño entregado. Gracias por tu apoyo y por ser una de las personas más importantes durante este camino y durante mi vida.

A la Fanny, por ser una amiga incondicional, a pesar de la distancia y mi desapego. Por escucharme y por confiarme su vida. Por los buenos momentos, las salidas a comer y las chancheadas caseras. Por ser una partner en nuestras vacaciones soñadas de aquí al infinito.

Al Jorge y al Pato, que durante los momentos difíciles siempre estuvieron para contenerme y no dejaron de preocuparse por mí. Por las oncecitas, por las idas al Kanela, por las copuchas, por las historias, por las risas y por la honestidad. Por dejarme ser parte de sus vidas.

Al Feña, la Mari, al Mavri, al Stefan, la Ceci, la Galia y la Caro, por los momentos felices, las aventuras, los buenos carretes, las discusiones importantes, la compañía y la preocupación. A la Nata y la Coni R. por esas juntas milagrosas que me hacían el día más feliz. Al Seba, el Dani y la Coni H., que a pesar de llegar hace poco a mi vida, han sido de gran apoyo y me han dado la compañía que necesitaba. Gracias a todos ustedes por darme momentos y experiencias que nunca olvidaré. Espero seguir recolectando anécdotas de nuestras vidas futuras.

A mis amigas del liceo, que nunca nos vemos y somos las peores, pero sé que están ahí para mí, al igual que yo estoy para ustedes.

A Felipe, mi profesor guía, tanto de la memoria como de la vida. Muchas gracias por tus consejos, por esas conversaciones y por confiar en mí. Por apoyarme en momentos difíciles y por ayudarme a salir adelante. Gracias por las enseñanzas que perdurarán por siempre.

A mi perrita, Diana, mi compañera de vida. Gracias por haberme acompañado durante 14 años, conteniéndome y alegrándome.

A la música, la naturaleza y los perritos por alegrarme constantemente.

Muchas gracias, hicieron de mi travesía por la Universidad una experiencia que volvería a repetir. Espero sigan en mi vida hasta el fin de los tiempos.

## Tabla de Contenido

1	Introducción .....	1
1.1	La humanidad y su relación con el cambio climático .....	1
1.1.1	Historia del desarrollo humano .....	1
1.1.2	Relación del efecto invernadero con el cambio climático.....	1
1.1.3	Impactos del cambio climático en otros recursos .....	3
1.1.4	Relación de la Ingeniería Civil Química con el cambio climático.....	3
1.2	Relación de la industria con el cambio climático.....	4
1.2.1	Emisiones de GEI por área a nivel mundial .....	4
1.2.2	Emisiones de GEI en Chile .....	6
1.2.3	Industria de gases en Chile.....	8
1.3	Proceso de separación y licuación de gases [16].....	9
1.4	Herramienta de cuantificación de impacto ambiental.....	10
1.4.1	Historia del ACV .....	11
1.4.2	Fortalezas del ACV [20] .....	11
1.4.3	Debilidades del ACV.....	12
1.5	Objetivos.....	12
1.5.1	Objetivo general .....	13
1.5.2	Objetivos específicos .....	13
2	Análisis de Ciclo de Vida de una planta de separación y licuación de gases: Línea base.....	14
2.1	Metodología del ACV [22].....	14
2.2	Antecedentes sobre ACV de plantas ASU .....	15
2.3	Modelación del proceso para el análisis .....	16
2.3.1	Unidad funcional.....	16
2.3.2	Alcance del ACV .....	17
2.4	Análisis de ciclo de vida del caso basal .....	18
2.4.1	Supuestos.....	18
2.4.2	Análisis de huella de carbono .....	20
2.4.3	Análisis de huella hídrica .....	23
3	Alternativas de cambio .....	26
3.1	Cambios estratégicos .....	26
3.1.1	Uso de energía solar en el proceso. ....	26

3.1.2	Alternativas de enfriamiento de agua .....	27
3.2	Cambios tácticos .....	30
3.2.1	Alternativas orientadas al cambio de maquinaria .....	30
3.2.2	Estudio de detenciones de la planta.....	32
3.2.3	Versión economizadora de Chiller.....	32
3.2.4	Cambio de refrigerante .....	35
3.2.5	Uso de nitrógeno como refrigerante.....	36
4	Evaluación de alternativas de cambio .....	38
4.1	Evaluación ambiental .....	38
4.2	Inversión económica de las alternativas .....	40
4.3	Evaluación de escenarios mixtos.....	41
5	Conclusiones y recomendaciones.....	46
6	Bibliografía.....	47
7	Anexos .....	52
7.1	Diagrama de flujos de una ASU .....	52
7.2	Huella de carbono del caso basal de estudio .....	54
7.2.1	Electricidad.....	54
7.2.2	Hidrógeno .....	54
7.2.3	Refrigerante .....	55
7.2.4	Transporte.....	55
7.3	Huella hídrica del caso basal de estudio .....	56
7.3.1	Electricidad.....	56
7.3.2	Hidrógeno .....	56
7.3.3	Refrigerante .....	57
7.4	Estudio de utilización de chiller economizador [47] .....	57
7.5	Transferencia de calor con nitrógeno líquido.....	59
Opción 1	.....	61
Opción 2	.....	62

## Índice de Tablas

Tabla 1. Consumo de insumos y servicios en planta de separación y licuación de gases atmosféricos para 1.000 [t] de producto líquido. ....	17
Tabla 2. Datos de distribución de productos líquidos. ....	20
Tabla 3. Potencial de Calentamiento Global de GEI. [7].....	21
Tabla 4. Escenarios de suministro de energía solar fotovoltaica. ....	27
Tabla 5. Comparación de compresores usados y propuestos. ....	31
Tabla 6. Comparación de consumo de electricidad en función al modo de operación de la planta. .	32
Tabla 7. Potencia del compresor de un chiller con respecto a temperatura de aceite sub-enfriado. [48] .....	34
Tabla 8. Comparación entre alternativas de refrigerantes [51]......	36
Tabla 9. Alternativas de transferencia de calor con nitrógeno líquido.....	37
Tabla 10. Costo inversión de las alternativas en MUSD .....	41
Tabla 11. Identificación de escenarios. ....	42
Tabla 12. Huella de carbono de la producción de 1 [kWh] con diferentes fuentes energéticas. ....	54
Tabla 13. Huella de carbono de la electricidad utilizada en la producción de 1.000 [t] de producto líquido.....	54
Tabla 14. Huella de carbono de la producción de 1 [kg] de hidrógeno.....	54
Tabla 15. Huella de carbono de la producción de 1 [kg] de refrigerante.....	55
Tabla 16. Huella de carbono del transporte marítimo de 1 [t*km] de refrigerante.....	55
Tabla 17. Huella de carbono de disponer 1 [kg] de refrigerante. ....	55
Tabla 18. Huella de carbono del transporte refrigerado de 1 [t*km] de producto líquido.....	55
Tabla 19. Huella de carbono del transporte refrigerado por tonelada de producto líquido. ....	56
Tabla 20. Huella hídrica de la producción de 1 [kWh] con diferentes fuentes energéticas.....	56
Tabla 21. Huella hídrica de la electricidad utilizada en la producción de 1.000 [t] de producto líquido.....	56
Tabla 22. Huella hídrica de la producción de 1 [kg] de hidrógeno. ....	56
Tabla 23. Huella hídrica de la producción de 1 [kg] de refrigerante. ....	57
Tabla 24. Datos correspondientes a la transferencia de calor del aire. ....	61
Tabla 25. Datos correspondientes a la transferencia de calor de nitrógeno. ....	61

## Índice de Figuras

Figura 1. Emisiones históricas a nivel de mundial de CO <sub>2</sub> . [5] .....	2
Figura 2. Variación de la temperatura global por año. [6] .....	2
Figura 3. Escasez de agua en cuencas a nivel mundial (2011). [9] .....	3
Figura 4. Distribución emisiones de GEI por sector a nivel mundial al 2010. [11] .....	5
Figura 5. Emisiones de CO <sub>2</sub> equivalente por sector industrial a nivel mundial. [12] .....	6
Figura 6. Emisiones netas históricas de GEI en Chile. [7] .....	7
Figura 7. Emisiones de CO <sub>2</sub> equivalente por sector en Chile al 2006. [7].....	7
Figura 8. Diagrama de bloques de una unidad de separación y licuación de gases atmosféricos. [16]9	
Figura 9. Etapas del ciclo de vida de un producto. ....	11
Figura 10. Escenarios de análisis de huella de carbono según EIGA. [24] .....	15
Figura 11. Entradas y salidas del proceso global. ....	17
Figura 12. Huella de carbono de 1.000 toneladas de producto líquido. ....	21
Figura 13. Huella de carbono de matriz de generación eléctrica propuesta. ....	22
Figura 14. Huella hídrica de 1.000 toneladas de producto líquido. ....	24
Figura 15. Disponibilidad de agua por región en Chile. [34] .....	25
Figura 16. Radiación solar anual en la sexta región de Chile. [36] .....	26
Figura 17. Torre de enfriamiento evaporativo de tiro inducido. [40] .....	28
Figura 18. Torre de enfriamiento con circuito cerrado. [41] .....	29
Figura 19. Torre de enfriamiento híbrida. [42] .....	30
Figura 20. ASU con recuperación de energía integrada en compresor. [47] .....	31
Figura 21. Diagrama de flujos de un chiller estándar. [48] .....	33
Figura 22. Diagrama de flujos de un chiller economizador. [48] .....	34
Figura 23. Cambio en la huella de carbono del caso basal con respecto a las alternativas. ....	39
Figura 24. Cambio en huella hídrica del caso basal con respecto a las alternativas.....	40
Figura 25. Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente disminuidas por 1 [MUSD] invertido en cada escenario con respecto a 1.000 toneladas de producto líquido. ....	43
Figura 26. Consumo de agua dulce disminuido por 1[MUSD] invertido en cada escenario con respecto a 1.000 toneladas de producto líquido. ....	44
Figura 27. Diagrama de proceso para un sistema de refrigeración con intercambiador economizador. [48] .....	57
Figura 28. Potencia de compresión como función de la temperatura sub-enfriada del refrigerante en el intercambiador economizador. [48].....	58
Figura 29. Flujo másico de refrigerante en circulación en función de la temperatura sub-enfriada del refrigerante en el intercambiador economizador. [48].....	59

# 1 Introducción

## 1.1 La humanidad y su relación con el cambio climático

### 1.1.1 Historia del desarrollo humano

El desarrollo de la humanidad está definido como el proceso por el cual las sociedades transitan desde condiciones de vida caracterizadas por la baja producción y la pobreza a un nivel mucho más alto de consumo y de estándar material [1]. Este criterio ha sido el motor fundamental para clasificar a los países a la fecha, obteniendo grupos de países con alto nivel de desarrollo, principalmente en el hemisferio norte, y otros de menor nivel de desarrollo. Esta división se vio marcada por la Revolución Industrial, puesto que este hecho permitió a ciertos países, con más bienes y poder, desarrollar la producción en línea y utilizar la máquina a vapor. Estos cambios trajeron oportunidades económicas favorables, promoviendo un buen índice de desarrollo.

Sin embargo, esta productiva y eficiente máquina de vapor obtenía su energía de la combustión de carbón, emitiendo óxidos de carbono y compuestos sulfurados, provocando el denominado Efecto Invernadero descubierto por científicos algunas décadas más tarde. [2] Este efecto se profundizó con el uso de otros combustibles fósiles.

Durante el siglo XX, el desarrollo fue comprendido desde un lente puramente económico, ignorando el efecto que la emisión de gases provocaba en el ambiente. En el siglo XXI se espera incluir este tipo de aspectos en la evaluación de proyectos, debido a que los aspectos técnicos y económicos no bastan para dar una solución completa a problemas relacionados con el desarrollo humano, pues no atienden, en primera línea, los efectos negativos en la naturaleza que, a su vez, afectan a los seres humanos.

### 1.1.2 Relación del efecto invernadero con el cambio climático

A modo de contextualización, el efecto invernadero es un fenómeno que permite mantener una temperatura adecuada en la Tierra para la existencia del ecosistema actual. [3]

Técnicamente, el efecto invernadero se produce debido a que la mayor parte de la luz visible presente en la radiación solar cruza la atmósfera para calentar la superficie planetaria y luego esta emite energía en frecuencias menores de radiación infrarroja. Esta última es absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI), los que a su vez irradian gran parte de esta energía a la superficie y atmósfera inferior. [4]

Esto implica que mientras mayor sea la concentración de estos gases en la atmósfera, mayor es la temperatura en la Tierra, debido al cambio en el balance de energía de la misma, haciendo que la salida de energía desde la Tierra al universo decrezca. Antes del siglo XX, estas emisiones gaseosas no fueron un problema, puesto que la intervención del hombre en el ambiente y en la atmósfera, hasta ese momento, había sido poco significativa a escala global.

Desde mediados del siglo XX hasta la fecha, los científicos han obtenido datos que demuestran que las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera estaban aumentando muy



rápida. Además, las investigaciones dieron a conocer que esta situación había traído consecuencias sobre los núcleos de hielo y los sedimentos lacustres debido a fluctuaciones abruptas en el pasado [2]. La Figura 1 muestra los resultados de estos estudios hasta el 2010 [5] y la Figura 2 muestra el cambio en la temperatura promedio de la Tierra durante el mismo período de tiempo [6].

### Emisiones globales de dióxido de carbono desde 1850 al 2011 (MtCO<sub>2</sub>)

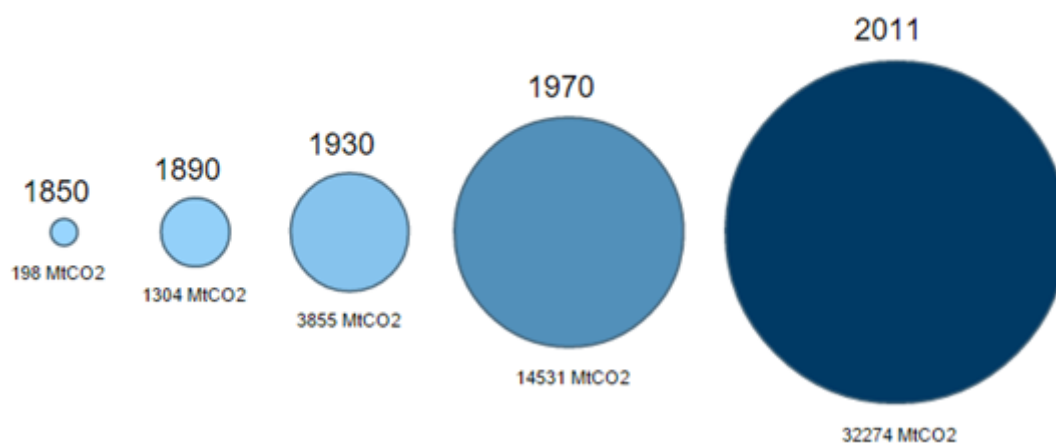


Figura 1. Emisiones históricas a nivel de mundial de CO<sub>2</sub>. [5]

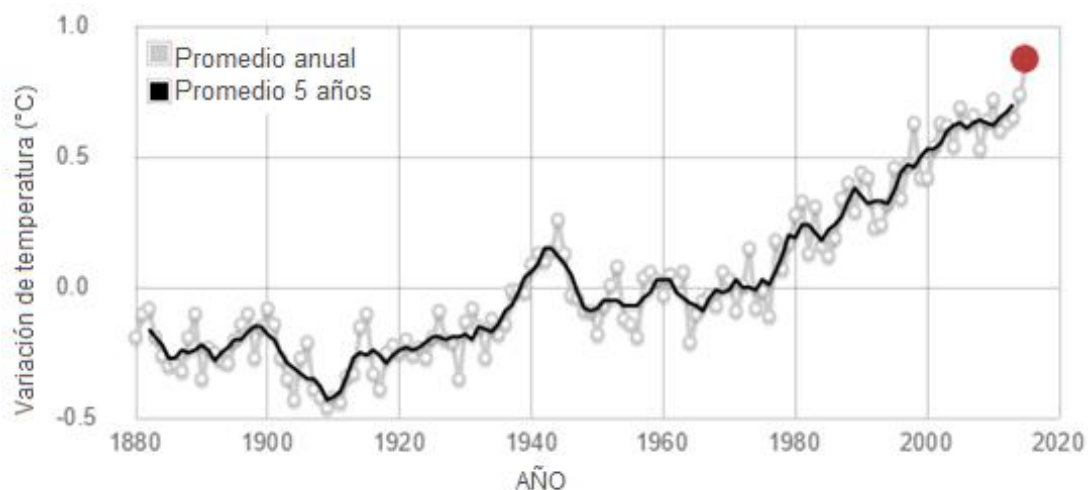


Figura 2. Variación de la temperatura global por año. [6]

De esta forma, se presenta un enlace directo entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el cambio climático. Es por esto que se creó una unidad para cuantificar y comparar el impacto de los GEI, llamada Potencial de Calentamiento Global o *Global Warming Potential* (GWP) [7]. Este potencial se mide en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes, normalizando el potencial de cada uno de los GEI con respecto al CO<sub>2</sub> [7]. Estos potenciales serán mencionados en la sección 2.4.2.

### 1.1.3 Impactos del cambio climático en otros recursos

Si bien, existe abundante información sobre emisiones de GEI, existen algunos factores que todavía no están siendo evaluados de la misma manera, resaltando el uso de agua. Este recurso es considerado como renovable, puesto que cumple con un ciclo que permite obtenerlo constantemente [8]. Estudios de las consecuencias del cambio climático y en particular, del calentamiento global, muestran resultados alarmantes con respecto a la disponibilidad de agua en las distintas formas en la que se presenta en el planeta. En la Figura 3 se presenta la escasez de agua en las principales cuencas a nivel mundial.

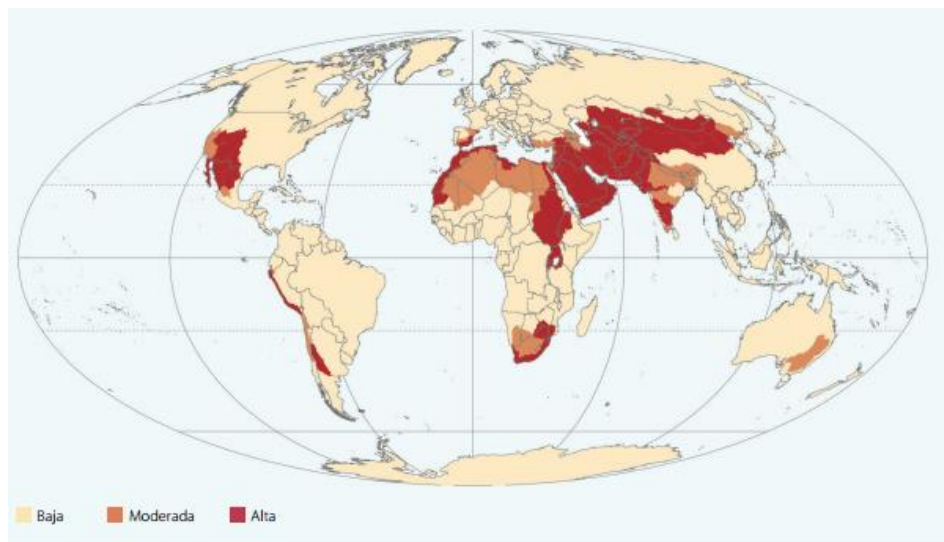


Figura 3. Escasez de agua en cuencas a nivel mundial (2011). [9]

Factores como el derretimiento de glaciares y ausencia de precipitaciones, sumado al uso excesivo de este recurso por parte de la industria y la explotación de recursos naturales, han propiciado que el cambio climático afecte en la disponibilidad de este recurso. Así, se hace necesario realizar inventario del uso de agua, de manera de encontrar soluciones que permitan consumir responsablemente de este insumo.

### 1.1.4 Relación de la Ingeniería Civil Química con el cambio climático

La Ingeniería Civil Química es una disciplina encargada de investigar y desarrollar nuevos procesos, incluyendo el diseño de plantas, la gestión, operación y planificación de estos. Desde 1888, año de creación de esta especialidad en Estados Unidos, ingenieros químicos han estado revolucionando el área industrial mejorando e innovando en los procesos productivos [10]. El enfoque principal de esta profesión durante el siglo XX fue maximizar la producción reduciendo los costos, sin importar el consumo de energía, agua o recursos naturales.

Debido a la necesidad de tomar acciones que reviertan las consecuencias del cambio climático, la industria ha comenzado a preocuparse por la utilización de recursos, mejorando el rendimiento económico, y además se deben cumplir diversas normas de emisiones existentes en cada lugar del mundo. Durante las últimas dos décadas, además, la humanidad se ha empezado a preocupar

por la vida en el planeta, introduciendo el concepto de sustentabilidad, abarcando el desarrollo social, ambiental y económico de la humanidad sin condicionar el bienestar de futuras generaciones [11]. Esto significa que la industria deberá seguir cambiando para adaptarse a un nuevo escenario, puesto que hoy se propone no interferir en el desarrollo sostenible de las generaciones.

El rol del ingeniero químico cobra especial importancia en dicho cambio, ya que estos profesionales tienen el conocimiento sobre el funcionamiento y la operación de un proceso industrial, permitiendo rediseñar procesos y optimizar algunas variables de salida relevantes, como la magnitud de las emisiones, el uso de energía y el manejo del agua.

El primer paso para identificar qué variable tiene a un impacto significativo en el ambiente, es medir. De este modo, un seguimiento continuo de los indicadores de impacto permite evaluar el efecto de los cambios que se implementen en los respectivos procesos. Por otro lado, la métrica de impactos también permite distinguir aquellas etapas que provocan un impacto mayor, primeras candidatas a ser modificadas.

## 1.2 Relación de la industria con el cambio climático

### 1.2.1 Emisiones de GEI por área a nivel mundial

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) estima las emisiones globales regularmente [12]. Los datos para el año 2010, correspondiente a la última versión, son representados en la Figura 4. La producción de energía, el transporte, la industria y la agricultura y uso de la tierra y silvicultura, corresponden a las actividades económicas que representan, en conjunto, un 84% de las emisiones globales de GEI. El sector de suministro de energía que expone el IPCC abarca las emisiones globales provenientes de la combustión de fuentes o hidrocarburos fósiles para abastecer de calor y energía en todos los sectores, considerando por separado las emisiones de la energía eléctrica. El IPCC ha definido los tratamientos de residuos y aguas residuales como un sector separado.

En la Figura 4 se puede observar que las emisiones se dividen en 6 grandes sectores, que se describirán a continuación [12]:

Electricidad y calor: Corresponde al 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este sector comprende la combustión de carbón, gas natural, petróleo relacionada con la generación de calor, y la electricidad utilizada tanto en el sector industrial como en el domiciliario.

Industria: Corresponde al 21% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones de GEI de la industria provienen principalmente de la combustión de hidrocarburos fósiles en las instalaciones de abastecimiento energético. Este sector también incluye las emisiones de sustancias químicas, metalúrgicas, y los procesos de transformación de minerales no asociados con el consumo de energía y las emisiones de las actividades de gestión de residuos.

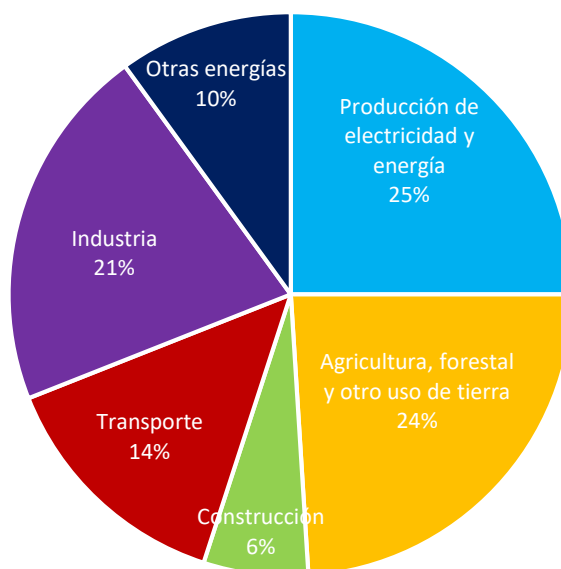
Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra: Corresponde 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este sector contempla las emisiones provenientes principalmente de la

agricultura, es decir, cultivo de cosechas y ganado, y la deforestación. Esta estimación no incluye el CO<sub>2</sub> que los ecosistemas fijan de la atmósfera por el secuestro de carbono en la biomasa, materia orgánica muerta y los suelos, que compensan aproximadamente el 20% de las emisiones de este sector. [13]

Transporte: Corresponde al 14% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones de este sector están involucradas principalmente con la combustión en base a hidrocarburos fósiles en transporte automotriz, ferrocarril, aéreo y el transporte marítimo. Este fenómeno se da debido a que casi todos los medios mencionados anteriormente obtienen la energía de los combustibles a base de petróleo, principalmente gasolina y diésel.

Construcción: Corresponde al 6% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este sector contempla las emisiones generadas por el consumo energético en el lugar y la combustión de combustibles para calefacción en edificios o cocina en los hogares.

Otros tipos de energía: Corresponde al 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Esta fuente de emisiones refiere a todas las generadas por el sector de la energía que no están asociadas directamente con la electricidad o el calor de producción industrial, tales como la extracción de combustibles, refinación, procesamiento y transporte.



*Figura 4. Distribución emisiones de GEI por sector a nivel mundial al 2010. [11]*

Si bien, el sector industrial no corresponde a la fracción mayor de emisiones de GEI, es el ámbito de estudio debido a la influencia de la ingeniería química en el mismo. La industria, a su vez, se divide en subsectores de producción, los cuales se pueden ver en la Figura 5 [12]. A grandes rasgos, los sectores más representativos son la industria química, producción de cemento, extracción de metales férricos y no férricos, y otras industrias. Sin embargo, este escenario puede

no representar la situación de cada país, por lo que se decide realizar un análisis de la industria chilena, contexto donde se desarrollará este trabajo.

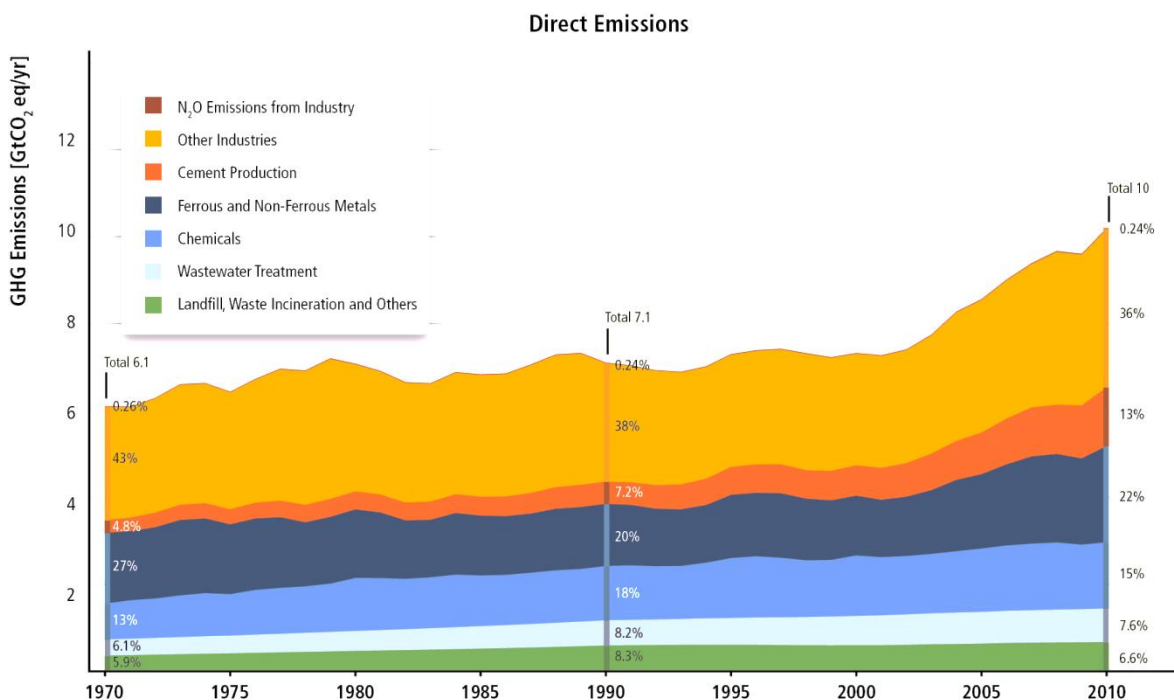


Figura 5. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por sector industrial a nivel mundial. [12]

### 1.2.2 Emisiones de GEI en Chile

En el contexto mundial, la participación de Chile en emisiones de GEI es de un 0,26% del total, lo que sitúa al país en el lugar 44, de mayor a menor emisor, de un total de 186 países [12]. En el ranking de PIB, Chile se sitúa en el lugar 39 [14], sugiriendo una relación entre el desarrollo económico del país y las emisiones de GEI.

El inventario nacional de GEI estima las emisiones provenientes de diversos sectores que realizan actividades antrópicas, e incorpora las capturas de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, correspondientes al producto de la fotosíntesis realizada por los bosques y plantaciones de áreas verdes. Es así como la Figura 6 muestra las emisiones netas, es decir, el total emisiones menos la fijación de GEI. Para elaborar el inventario nacional de emisiones, se usaron las guías del IPCC de 1996 y sus códigos de buenas prácticas del año 2000, adicionando voluntariamente los resultados de su inventario de emisiones del año 2006.

Se observa que antes del año 1990 la captura de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera era suficiente para compensar las emisiones antropogénicas. Existen 2 factores que revierten esta situación desde ese año, correspondientes una disminución en el uso de la tierra, debido a la deforestación y a la expansión de la población, y al crecimiento económico del país, lo que implica que los diferentes sectores deban producir más, y esto se ve reflejado en un alza de emisiones de GEI. [7]

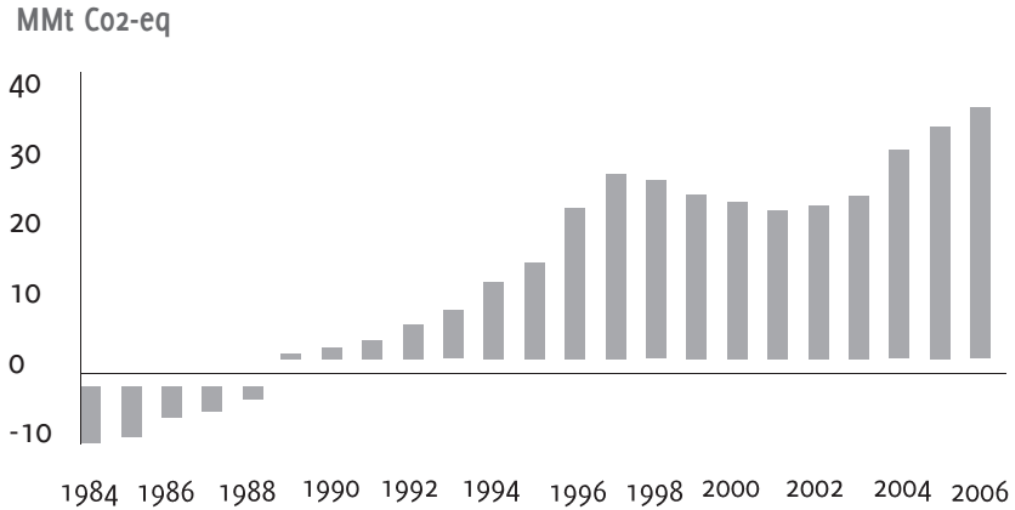


Figura 6. Emisiones netas históricas de GEI en Chile. [7]

Las emisiones en Chile están separadas por sector, e incluyen la energía que se ocupa en cada uno de ellos. Se destaca que hoy, en Chile, la principal fuente de energía continúa proviniendo de recursos no renovables, como el carbón, petróleo y derivados de este. El sector transporte y de generación eléctrica son los que más aportan en el total de emisiones de GEI con un 29% cada uno, según se observa en la Figura 7 [7]. La industria manufacturera, construcción y minería también son sectores con emisiones significativas en el país, ya que, además de que aporta el 23% de las emisiones de GEI, constituyen la principal fuente económica del país.

El presente trabajo se enmarca en el sector industrial manufacturero, cuya disminución de emisiones de GEI puede ser reducida en los próximos años si se toman medidas para ello.

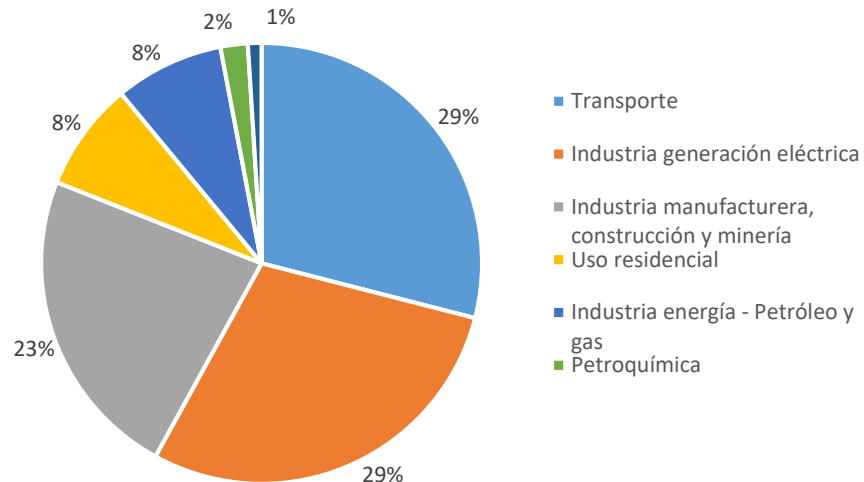


Figura 7. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por sector en Chile al 2006. [7]

### 1.2.3 Industria de gases en Chile

Además de los grandes sectores industriales, como la minería, celulosa o producción de alimentos, existen algunas industrias que aportan productos necesarios para el correcto desempeño de otros procesos. Una de estas industrias corresponde a la encargada de producir gases. Si bien esta industria abastece de recursos a una gama diversa de procesos, no existe información cuantitativa sobre su participación en el total de producción mundial ni chileno. Tampoco existe una cuantificación de emisiones de GEI para el sector industrial de gases, siendo un desafío pendiente.

Si bien la importancia ambiental de esta industria no se ve reflejada directamente en cifras nacionales, sus instalaciones y procesos están integrados en la cuantificación de impacto del ciclo de vida de diversas industrias. A continuación, se describe el uso de estos gases en los sectores más demandantes [15]:

**Minería:** Los gases están presentes en diversas etapas de este sector, debido a que se utiliza para diferentes propósitos, como aumentar la capacidad de producción o disminuir la contaminación. Se utiliza oxígeno para flotación de minerales, combustión, oxigenación de campamentos mineros y tratamiento de efluentes. Además, se utiliza nitrógeno para enfriamiento industrial y dióxido de carbono para neutralización de pH y biolixiviación. Usualmente, las industrias de gases instalan una planta de producción o *Air Separation Unit* (ASU) en el recinto minero o aledaño a él, debido al alto requerimiento de estos insumos.

**Industria petroquímica:** En este sector es importante el manejo de productos inflamables o el control de la humedad del aire debido a las reacciones existentes. Es por esto que los gases se usan para proteger los procesos y los equipos, y ciertas operaciones de las plantas de una refinería utilizan gases para optimización. Así, el nitrógeno se usa para inertización, recuperación de solventes, recuperación de catalizadores, impulsión de productos y *sparging* (burbujeo para eliminar sustancias disueltas). El oxígeno se usa en planta de tratamiento de afluentes, mejoramiento de plantas existentes de tratamiento de RILES, optimización de craqueo y unidades recuperadoras de azufre. Por último, el CO<sub>2</sub> se utiliza para neutralización de líquidos y purificación de corrientes intermedias de hidrocarburos.

**Industria química:** En este sector, los gases se utilizan para lograr una mayor eficiencia y competir con mejores resultados. El nitrógeno se utiliza para inertización, *blanketing*, purgado, impulsión de productos químicos y enfriamiento. Se utiliza CO<sub>2</sub> para extinción de incendios, corrección de pH, extracción supercrítica y fotosíntesis, y oxígeno para fermentación.

**Celulosa:** Las aplicaciones conectadas con la industria de gases corresponden a impulsión de productos químicos con nitrógeno, blanqueo de celulosa y oxicombustión con oxígeno, y ajuste de pH con CO<sub>2</sub>.

**Acuícola:** En este sector, los gases tienen gran importancia en el proceso, por lo que las industrias de gases instalan plantas de producción cerca de los recintos de cultivo, de manera de optimizar el transporte. El oxígeno es el gas más importante para este proceso, ya que contribuye a

asegurar la calidad del agua de pisciculturas, además de la mantención de condiciones durante el transporte de los peces vivos por tierra y mar. Además, mantiene las condiciones óptimas para el cultivo de salmónidos durante períodos de engorda, evitando consecuencias negativas debido a presencia de mareas anóxicas, lo que minimiza el riesgo de asfixia. Otro gas importante es el  $\text{CO}_2$ , puesto que enriquece el medio de cultivo de algas facilitando la fotosíntesis.

Alimentos: En este sector, la utilización de gases es muy variada, ya que las aplicaciones van desde la carbonatación de bebidas con  $\text{CO}_2$ , hidrogenación de aceites y productos derivados con hidrógeno, enfriamiento, control de densidad e inertización de ambientes y envases con nitrógeno. La importancia general de los gases en el sector es mantener las condiciones óptimas en el ambiente para que los alimentos no reaccionen con el oxígeno y la humedad del aire, puesto que esto traería consecuencias negativas en los productos, como cambios en las propiedades o en el aspecto físico.

Vitivinícola: La aplicación de los gases en este sector es la generación de ambientes inertes, para controlar la oxidación de los mostos y el vino. Es así como el nitrógeno y el  $\text{CO}_2$  son usados en etapas como difusión, remontaje, homogeneización, carbonatación y embotellado del vino.

### 1.3 Proceso de separación y licuación de gases [16]

Para poder obtener productos tales como oxígeno, nitrógeno y argón líquido, se requiere de una Unidad de Separación de Aire (ASU). Las operaciones unitarias de este proceso son presentadas en el diagrama de bloques de la Figura 8. A continuación, se explica el detalle del proceso y los equipos que lo conforman.

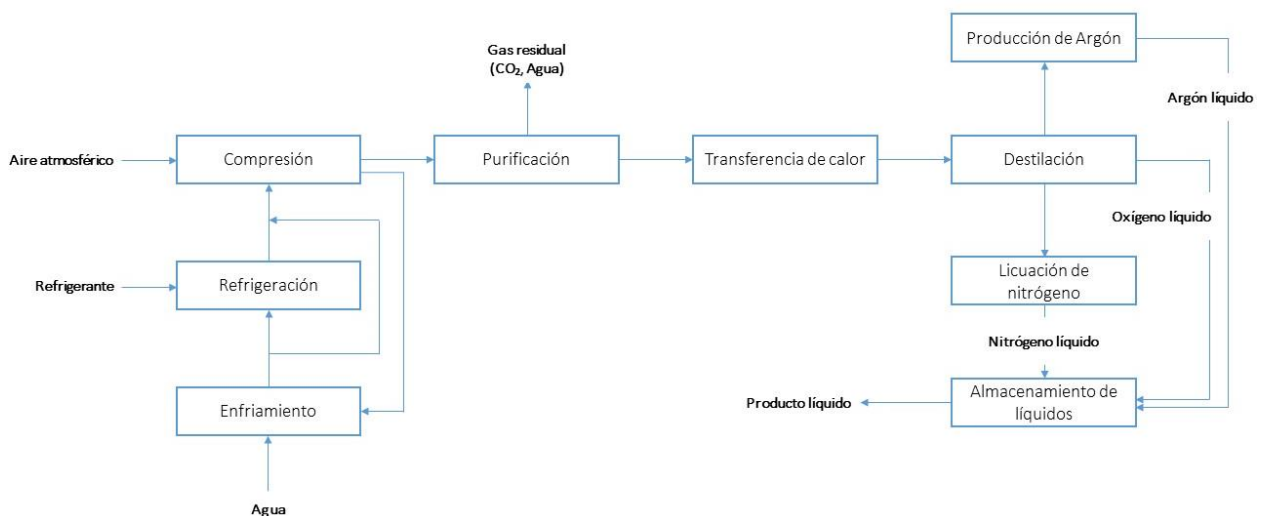


Figura 8. Diagrama de bloques de una unidad de separación y licuación de gases atmosféricos. [16]

En una ASU, se extrae aire atmosférico y se aumenta su presión en un compresor. En esta etapa se incrementa también la temperatura, justificando el uso de etapas de transferencia de calor



con agua fría. Esta unidad consta de 3 etapas de compresión, haciendo necesarias 3 etapas de enfriamiento para mantener el aire a temperatura ambiente a la salida.

Después de la compresión, se purifica el aire en torres de adsorción que se regeneran mediante un cambio significativo de temperatura. En esta etapa de purificación se separan aquellos componentes que puedan entorpecer la correcta operación de etapas posteriores, como el agua y el CO<sub>2</sub>.

Después de extraídos los compuestos anteriores, se enfría el aire en un proceso de transferencia de calor para reducir la temperatura de los gases desde temperatura ambiente a temperaturas criogénicas. Esta etapa está compuesta por un sistema de integración de calor que aprovecha las bajas temperaturas de las diversas corrientes del propio proceso.

Una vez que el aire está suficientemente frío, se transfiere a la destilación que es la operación fundamental de la planta, puesto que separa los gases por sus diferencias en puntos de ebullición. La destilación ocurre en una torre que tiene una etapa a alta presión y otra a baja presión, lo que favorece la obtención de productos de alta pureza. De la torre de destilación, se obtiene un producto líquido como el oxígeno, el que se almacena directamente. Sin embargo, se requiere de una etapa posterior de licuación para obtener nitrógeno líquido, haciendo necesario un equipamiento destinado a producir la refrigeración.

De forma paralela, se encuentra la unidad de producción de argón, que es extraído de la sección intermedia de la torre de destilación. En esta unidad, el argón es purificado extrayendo el oxígeno presente mediante la incorporación de hidrógeno y luego es licuado en la parte superior de la torre de destilación.

Finalmente, se tienen los tanques de almacenamiento de productos líquidos. En el anexo 7.1 se presenta un diagrama de flujos simplificado del proceso.

Si bien, se puede observar que el proceso no emite directamente contaminantes a la atmósfera o no interviene otro recurso natural, tiene un fuerte consumo energético debido a la utilización de compresores. Esto afecta directamente en la emisión de GEI, haciendo muy significativo para el proceso estudiar y buscar estrategias que reduzcan el consumo energético.

#### 1.4 Herramienta de cuantificación de impacto ambiental

El impacto ambiental de un objeto o proceso puede ser descrito de forma cualitativa o cuantitativa, utilizando diversas herramientas que difieren en enfoques o niveles de profundización [17]. Para el estudio que se desea realizar, es necesaria una herramienta que pueda cuantificar los indicadores de impacto ambiental, relacionados con el conteo de emisiones y consumo hídrico, proponiendo el uso de la herramienta de análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que permite contabilizar impactos ambientales mediante distintos indicadores. Para contextualizar, el ciclo de vida de un producto

abarca su historia completa, desde la extracción de materias primas hasta el momento en que el producto o sus partes sean dispuestos en el ambiente, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Etapas del ciclo de vida de un producto.

Un ciclo de vida considera todos los insumos y actos necesarios para fabricar un producto o proveer un servicio, poniendo atención en el proceso mismo de fabricación y la historia de sus componentes, desde la cuna a la disposición final [18]. Por ser una de las herramientas que entrega mayor información, se decide utilizar en la evaluación de impacto ambiental de una planta de gases.

#### 1.4.1 Historia del ACV

Esta herramienta se originó simultáneamente en Estados Unidos y en Europa. El primer análisis se realizó en 1969 por el *Midwest Research Institute* para Coca Cola, empresa que buscaba reducir el consumo de recursos y sus emisiones al ambiente. Estos estudios continuaron durante los años 70, estimándose un total de más de 60 análisis. [19]

La SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), fundada en 1979, fue la primera organización sin fines de lucro que desarrolló y dirigió discusiones científicas acerca del ACV, formulando en 1993 un código de prácticas, que tiene como fin homogeneizar la metodología de trabajo de los estudios que se realizan. Para normalizar completamente el ACV, se creó la norma ISO 14.040 para la evaluación del ciclo de vida (Principios y marco) en 1997, para ser completada finalmente con una serie de normas adicionales en 2006, componiendo la norma ISO 14.044 para la evaluación del ciclo de vida (Requisitos y directrices) [19].

#### 1.4.2 Fortalezas del ACV [20]

La realización de un análisis de ciclo de vida facilita el diagnóstico de los pasos de la historia de un producto, ayudando a identificar cuáles provocan mayor impacto en el ambiente. La identificación de etapas críticas y la evaluación de estrategias para disminuir los impactos ambientales asociados a un producto, ayudando al cumplimiento de regulaciones ambientales vigentes. Además, esta herramienta integra diferentes indicadores de desempeño ambiental, haciendo posible la selección de uno que tenga directa relación con el producto. Por ejemplo, si es un proceso que consume altos niveles de energía, se puede evaluar y obtener soluciones específicas para disminuir energía en ese proceso, o si es un producto que en su vida útil libera altos niveles de gases de efecto invernadero o agotadores de ozono, se puede medir ese indicador y centrar el análisis en él. Esto abre un camino para que las empresas logren certificaciones ambientales, mejorando la propuesta de valor de un producto.

Otro punto a considerar es que el análisis permite lograr la optimización de procesos. Se trata de un punto importante a la hora de hablar de la economía del producto, puesto que permite

ahorrar costos al utilizar los recursos de manera responsable y mejorar la eficiencia. Para una empresa, este tipo de evaluaciones reducen los riesgos asociados a la competitividad con productos similares. Hoy, el uso correcto de los recursos es un factor diferenciador a la hora de ofrecer un producto o servicio, ya que las personas están prefiriendo este tipo de conductas al comparar dos productos similares.

En términos más generales, es posible mejorar la imagen de las marcas siguiendo las recomendaciones desprendidas de un ACV, diferenciándolas y mejorando el desempeño ambiental de una empresa. Esto da la posibilidad de ampliar el mercado, especialmente en economías de bienestar que siguen conductas responsables con respecto al uso de recursos, por ejemplo, países como Canadá, Australia o del norte de Europa.

### 1.4.3 Debilidades del ACV

Para realizar un Análisis de Ciclo de Vida de manera responsable se debe tener el mayor detalle de datos posible dentro de los límites del sistema. Esto implica que la recopilación de datos debiese ser exhaustiva, sin embargo, no siempre se dispone de información completa, debilitando la evaluación ambiental mediante ACV. Así, se debe asignar un rango de incertidumbre al análisis realizado, reconociendo de manera clara las suposiciones consideradas [18].

Se debe considerar, además, que al realizar un ACV se obtienen recomendaciones y estrategias para disminuir el impacto ambiental de un proceso o producto, mas no se tiene en cuenta la rentabilidad de las alternativas. Esto implica que, para realizar un análisis en las 3 dimensiones de la sustentabilidad, se deben determinar los costos asociados a la implementación de las recomendaciones y evaluar su impacto social, haciendo necesario el complemento de otros tipos de evaluación para decidir. [21]

Se debe considerar también que un ACV no necesariamente predice riesgos absolutos, puesto que podría no cuantificar los efectos reales específicos para un proceso o producto. Así, el ACV es una herramienta que tiene como principal función realizar comparaciones relativas de impacto entre procesos o productos. [21]

## 1.5 Objetivos

Considerando los antecedentes anteriores, el presente trabajo busca mejorar el desempeño ambiental de un proceso de separación y licuación de gases, utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar cambios. Se evaluará la huella de carbono y huella hídrica porque son indicadores que permiten determinar directamente el impacto en el planeta de un producto o un proceso. Además, el proceso de producción en estudio es intensivo en uso de energía y transferencias de calor.

El proceso estudiado no presenta características que hagan necesario el uso de otros indicadores, como la contaminación de aguas o fuentes emisoras de sustancias tóxicas para el

ecosistema. De esta forma, los objetivos propuestos para este trabajo se presentan a continuación.

#### 1.5.1 Objetivo general

Proponer y evaluar cambios en el proceso de una planta de producción de gases de escala industrial para reducir su impacto ambiental mediante ACV.

#### 1.5.2 Objetivos específicos

- Definir objetivos y alcance del ACV, analizando indicadores de medición de impactos como huella de carbono y huella hídrica.
- Realizar ACV modelando el proceso y actualizando la base de datos EcoInvent.
- Identificar operaciones más intensivas en impacto ambiental, considerando indicadores cuantitativos.
- Proponer cambios en el proceso, orientados a reducir el impacto ambiental del mismo.
- Realizar evaluación ambiental con ACV y evaluación económica de las propuestas de cambio.
- Recomendar cambios en el proceso sobre una jerarquización de las alternativas propuestas.

Este trabajo tiene un fin investigativo y comparativo, es decir, se generarán propuestas de cambio y se analizará la pertinencia de estas con respecto al caso actual.

## 2 Análisis de Ciclo de Vida de una planta de separación y licuación de gases: Línea base

### 2.1 Metodología del ACV [22]

El ACV contempla la recopilación y análisis de entradas y salidas del sistema para lograr resultados que muestren sus posibles impactos ambientales, con el objetivo de evaluar estrategias para su reducción.

En primera instancia, se debe determinar cuál es la unidad funcional del ACV, correspondiente a aquel producto o servicio que permitirá normalizar la futura comparación de ACV. La unidad funcional es cuantitativa y su modificación provoca diferentes resultados para las mismas alternativas. Tales resultados no se moverán linealmente. Así, fijar una unidad funcional normalizará la comparación y condicionará las magnitudes y conclusiones de los ACV. A modo de ejemplo, suponga el lector que se desea analizar cuál es la diferencia de impacto entre jugo contenido en una caja de cartón y en una botella de plástico. Se podría realizar el ACV considerando directamente una caja de cartón y una botella de plástico, pero estos recipientes no tienen las mismas dimensiones, puesto que la primera contiene 1 litro de jugo; y la segunda, 1,5 litros de jugo, haciendo que estas alternativas no sean comparables. Sin embargo, se puede escoger una unidad funcional enfocada en el jugo, es decir, medir el impacto que genera envasar 1 litro de jugo en cada tipo de recipientes, haciendo una relación de material ocupado y jugo envasado.

Luego, se deben determinar los límites del sistema. Esto corresponde a la elección de las etapas del proceso que se analizarán, fijando con ello el alcance del análisis. Algunos de los factores que se pueden considerar para la selección del límite del sistema se mencionan a continuación [23]:

- Límites entre el sistema tecnológico y naturaleza: Un ciclo de vida comienza con la extracción de las materias primas y las etapas finales incluyen generación de los residuos o posible reutilización, como reciclaje y producción de energía. El ACV puede tener distintos niveles de profundización dependiendo de los resultados que se desean obtener, y esta profundización depende del límite del sistema que se impone al análisis.
- Área geográfica: Esta tiene gran importancia dentro del ACV, puesto que la sensibilidad de los impactos ambientales varía según la región. Algunos factores que influyen son la densidad de población, condiciones geográficas como cuencas o valles, y ubicación con respecto a zonas naturales protegidas. Siguiendo con el ejemplo del jugo, no es lo mismo contar el impacto de jugo en Chile o en Europa, puesto que el primero es un país productor y Europa lo importa, sumando un factor de transporte. Asimismo, la posición geográfica se debe analizar en cada variable del ACV.
- Horizonte de tiempo: Se debe establecer límites temporales, a fin de determinar el impacto presente y futuro, y para esto se necesita información sobre la tecnología que es utilizada, la vida de los diferentes contaminantes, entre otros factores, que deben ser pertinentes con la limitación de tiempo escogida. Un factor clave, es conocer la vida útil de las instalaciones,

puesto que estas también impactan. Sin embargo, la inclusión de la vida útil y ciclo de vida de las instalaciones puede resultar un análisis costoso sin cambios significativos en los resultados del ACV [24].

Definiendo lo anterior, se procede a la recolección y gestión de datos. Es necesaria la obtención de datos que provengan de cada proceso considerado dentro de los límites del sistema. La recopilación de datos es el proceso que más recursos consume dentro del ACV. De esta forma, la reutilización de otros estudios puede facilitar el trabajo, pero se debe cuidar que estos representen al objeto de estudio. Existen diferentes bases de datos a disposición, que pueden usarse como referencia o como punto de comparación para el estudio.

## 2.2 Antecedentes sobre ACV de plantas ASU

Con respecto a la medición de impacto ambiental en procesos de separación y licuación de gases, existe una metodología para seguir la huella de carbono de un producto que está enfocada directamente en este tipo de procesos. Esta fue propuesta por la *European Industrial Gases Association* (EIGA), que especificó las variables que deben ser consideradas y propuso ciertos escenarios de análisis. El resumen de ellos se puede ver en la Figura 10 y una descripción más detallada se presenta a continuación. [25]

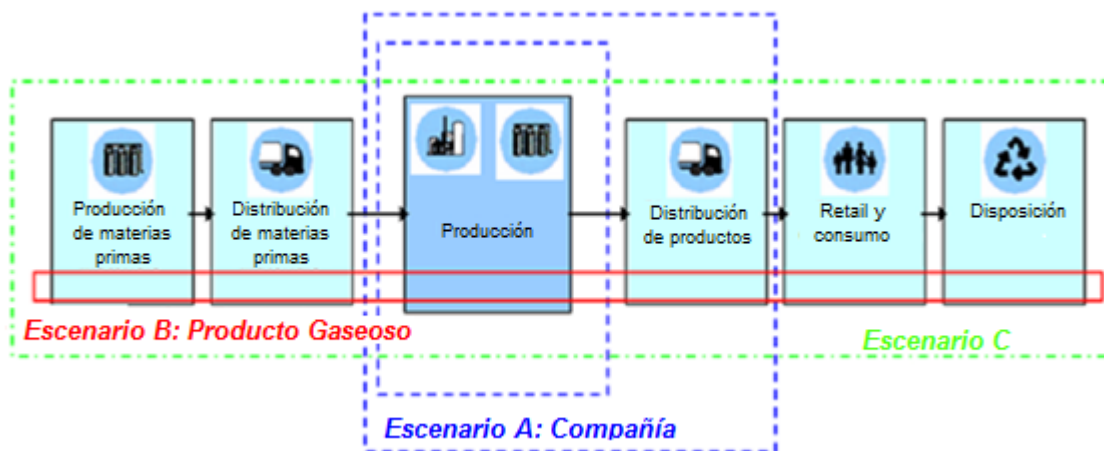


Figura 10. Escenarios de análisis de huella de carbono según EIGA. [24]

- Escenario A: Se estructura mediante la determinación del impacto de la empresa cubriendo actividades que estén bajo el control operacional de la organización, normalmente utilizado para realizar bases de datos del proceso y rendir cuentas sobre el escenario de la empresa con respecto al tema, mediante la presentación de informes corporativos. La norma ISO 14.044:2006 presenta detalles y los pasos a seguir para el cálculo de emisiones de GEI. [26]
- Escenario B: Corresponde al estudio de la huella de carbono del producto y la frontera de análisis cubre las emisiones relacionadas específicamente con las actividades de elaboración de un producto específico. Esto incluye una revisión de las emisiones que

pueden no estar dentro del control operacional de la organización. Sirve para determinar cuánto impacta un producto más que el funcionamiento de una empresa.

- Escenario C: Este análisis comprende la huella de carbono de las actividades de toda la organización, incluyendo todas las etapas del ciclo de vida de esta, contabilizando todos los impactos de la materia prima y del o de los productos. Esto es más amplio, pero requiere de una base de datos extensa que contenga todos los productos y actividades.

Este documento también define las posibles variables a incorporar en el estudio dependiendo del contexto de las distintas plantas de producción de gases, diferenciando plantas de gases atmosféricos, helio, dióxido de carbono, hidrógeno, entre otros. Estas variables se listan a continuación. [25]

- Consumo de energía (electricidad, gas, carbón, etc.).
- Refrigerantes (R22, amonio, etc).
- Consumo de agua.
- Residuos.
- Combustible para transporte.
- Factores de emisión empleados y referencias.

Esta es una primera base para componer un análisis de ciclo de vida de una planta de separación de gases. Sin embargo, los datos entregados en el documento no se refieren a la licuación de estos. Así, el proceso a analizar incorpora equipos o difiere en tecnología utilizadas en relación con la información disponible en el documento base de la EIGA.

### 2.3 Modelación del proceso para el análisis

Para realizar el análisis del sistema, se deben determinar las variables más importantes. Primero se analiza el contexto, correspondiente a una planta de separación y licuación de gases atmosféricos ubicada en la sexta región de Chile, que cuenta con una capacidad de procesamiento de aire atmosférico de 100 [t/día] y corresponde a la instalación de mayor producción de la empresa analizada.

#### 2.3.1 Unidad funcional

Se plantea como unidad funcional 1.000 toneladas de producto líquido, garantizando la confidencialidad de los datos de la empresa. Esta masa está compuesta por un 66 % de nitrógeno líquido, un 31,5% de oxígeno líquido y un 2,5% de argón líquido. Estas composiciones corresponden a un promedio de producción considerando los últimos 2 años.

Se decide utilizar una unidad funcional en base a una composición de los 3 productos líquidos debido a que los porcentajes de producción de cada uno de estos se mantienen relativamente constantes durante el año. Por otra parte, no existe diferenciación en el consumo energético ni hídrico de cada uno de estos productos. De esta forma, si se requiere el ciclo de vida de cada uno de los productos, se sugiere tomar un valor general de consumo y ajustarlo al porcentaje de producción respectivo.

Es importante destacar que el análisis propuesto busca mejorar el desempeño ambiental de la empresa y no está focalizado en uno de sus productos.

### 2.3.2 Alcance del ACV

Como se mencionó anteriormente, hay que fijar los límites del sistema a analizar. Si bien, un completo ACV debería contemplar desde la extracción de materia prima hasta la disposición del producto, se plantea evaluar el proceso productivo y la distribución de productos líquidos, como se menciona en el escenario A propuesto por EIGA. Se propone lo anterior pues el objetivo principal del análisis es identificar posibles mejoras con respecto al impacto de una planta, haciendo necesario identificar las actividades que tengan directa relación con la acción de la empresa, dejando fuera del margen de acción el uso y disposición del producto.

El proceso productivo se analiza considerando un balance global de entradas y salidas del proceso, tal como se observa en la Figura 11. En la Tabla 1 se muestra la magnitud de las entradas que se necesita para obtener 1.000 toneladas de producto líquido. Los datos corresponden a una situación promedio, pues los flujos varían dependiendo de la estación del año. Para tener un análisis aún más representativo, se recomienda analizar variaciones de estas magnitudes durante verano e invierno, estaciones más críticas dependiendo de la variable.

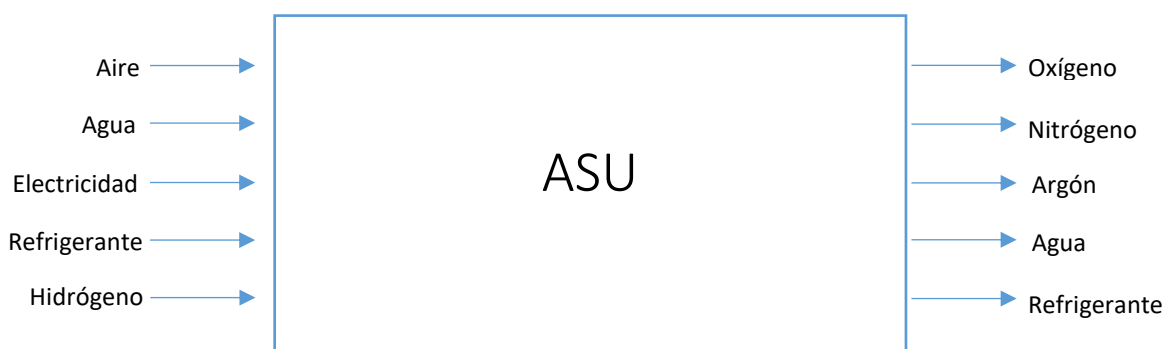


Figura 11. Entradas y salidas del proceso global.

Tabla 1. Consumo de insumos y servicios en planta de separación y licuación de gases atmosféricos para 1.000 [t] de producto líquido.

Variable	Valor	Unidad
Aire	1.070	[t]
Agua	2.320	[m <sup>3</sup> ]
Electricidad	1.133.000	[kWh]
Refrigerante	1	[kg]
Hidrógeno	103	[kg]

Se debe determinar el origen de cada una de las variables a estudiar. Existen algunos flujos, como el agua y el aire, que son directamente extraídos de la naturaleza, constituyendo este proceso el comienzo del ciclo de vida. Sin embargo, existen entradas que provienen de procesos productivos o prácticas humanas anteriores.



El hidrógeno y el refrigerante R22 (Freón) son productos de un proceso anterior, por lo que se evalúa cuál es el impacto de estos y su distribución. El consumo de los insumos mencionados es menor en comparación con otros, como se observa en la Tabla 1.

Una de las variables de mayor importancia a evaluar, debido a su magnitud, es el gasto energético de la planta. Para analizar este punto, se considera que la energía se obtiene del Sistema Interconectado Central (SIC) [27], resultando necesario distinguir qué fuentes primarias alimentan este sistema eléctrico.

Otro factor que se puede considerar es la infraestructura de la planta. Esto implica analizar cuál es el impacto de la misma durante su vida útil. Esta variable no se considerará debido a que la influencia de la construcción e instalación de máquinas no es significativa en los impactos evaluados, según experiencias similares [28], especialmente tomando una vida útil de 20 años, como en este caso.

Con respecto a las salidas del sistema, se considera que los productos líquidos son transportados en camiones especiales refrigerados, y el análisis se hace con respecto a la distancia recorrida durante la distribución. Esta variable cambia si el producto es nitrógeno, oxígeno o argón líquido, puesto que los clientes pueden ser específicos.

El agua y el Freón son considerados como residuos del sistema, incluyendo su disposición en el análisis. En particular, el agua solo se usa como servicio de refrigeración. Luego de su uso en el proceso, se reutiliza en regadío.

## 2.4 Análisis de ciclo de vida del caso basal

Para realizar el análisis, se propuso utilizar un software de modelamiento de ciclo de vida: GaBi, uno de los más utilizados a nivel mundial [19]. La principal característica de este programa tiene relación con la facilidad de manipulación de variables y procesos, debido a que el programa contiene datos provenientes de distintas bases de datos tales como EcoInvent, OpenLCA y datos de GaBi.

No obstante, se optó por manejar los inventarios de la base de datos EcoInvent directamente en una planilla de cálculo puesto que en GaBi se debían ingresar uno a uno los datos, sin agregar información valiosa al análisis. Hay alternativas comerciales que permiten una integración de EcoInvent en GaBi, pero no se dispone de tal herramienta.

Se decidió calcular en Excel utilizando datos de la base EcoInvent 2016 v3.3, Licencia Educacional, correspondiente a la versión más actual. [29]

### 2.4.1 Supuestos

Para el análisis, se recopiló información que fue entregada por parte de la empresa. Sin embargo, fue necesaria la incorporación de ciertas consideraciones y supuestos que permitieran lograr resultados pertinentes al caso de estudio, pues tanto el proceso como las condiciones locales no

están completamente desarrollados en las bases de datos. A continuación, se mencionan los supuestos realizados para cada una de las variables del problema.

- Electricidad

Como se mencionó, la electricidad usada en la planta proviene la red de distribución del Sistema Interconectado Central. Las bases de datos no poseen datos de esta red chilena como tal, existiendo dos opciones: buscar un sistema de electricidad de otro país similar o implementar el SIC en base a datos de inventario de energía provenientes de Chile. Se optó por la segunda alternativa, que permite incluir en el análisis la fuente primaria y factores geográficos. [23]

Así, el SIC está compuesto por 3 tipos de fuentes energéticas principales: 57,3% proviene de centrales termoeléctricas, 34,9% de centrales hidroeléctricas, 4,1% proviene de energía eólica y 3,7% proviene de energía solar [27]. El impacto de cada una de estas fuentes fue extraído de la base de datos, incluyendo emisiones de la generación y distribución de electricidad.

Cabe destacar que la matriz energética de Chile está cambiando constantemente, debido a medidas de carácter nacional que impulsan el uso de Energías Renovables No Convencionales. Esto cambia los resultados obtenidos significativamente.

- Hidrógeno

El hidrógeno corresponde a un insumo del proceso, utilizado en la producción de argón líquido. La planta en estudio incorpora la producción de este insumo, y el exceso es vendido como subproducto.

Por este motivo, en el análisis solo se incorpora el impacto de la producción de hidrógeno, puesto que no existe distribución ni disposición de este. Además, debido al bajo consumo de este componente, se decidió no estudiar etapas que anteceden a la producción, como la huella de carbono de los materiales usados en su elaboración.

- Refrigerante

El refrigerante usado en el proceso corresponde a Freón R22, perteneciente a la familia de los Hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y tiene un GWP de 1.700.

El estudio del ciclo de vida de esta variable se realizó considerando la producción, distribución hacia la planta, retiro de la planta y disposición. Esta fue una de las variables con mayor número de supuestos, puesto que existe poca información con respecto a este tipo de refrigerante.

Usando la base de datos, se obtuvo el impacto de la producción de R22, luego se estimó que este es importado desde China, para lo que se investigó el impacto del transporte. Posteriormente, el refrigerante debe ser retirado de la planta y dispuesto como residuo peligroso [30], para lo cual se usaron datos con respecto a residuos peligrosos generales puesto que no se encontraron datos específicos del R22 u otro tipo de refrigerante similar en la base de datos de EcoInvent.

- Transporte

Para realizar el análisis de la distribución, se usaron datos de la empresa sobre la capacidad del camión de distribución y la distancia recorrida en un mes. Para mantener la confidencialidad de la producción de la empresa, se llegó a una relación que permite determinar cuántos viajes se requerirían para distribuir las 1.000 toneladas de producto líquido, estudiando el caso particular de cada uno de los productos. Los resultados se observan en la Tabla 2.

*Tabla 2. Datos de distribución de productos líquidos.*

	<b>Nitrógeno líquido</b>	<b>Oxígeno líquido</b>	<b>Argón líquido</b>
Carga promedio de camión [t]	17	17	18
Distancia recorrida por viaje [km]	329	596	991
Viajes por unidad funcional	39	19	2
Distancia recorrida por unidad funcional [km]	12.831	11.324	1.982

Cabe mencionar que la relación obtenida corresponde a un promedio de la distancia que podría recorrer el camión en la distribución.

#### 2.4.2 Análisis de huella de carbono

La huella de carbono es una herramienta que consiste en el recuento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI que son liberadas a la atmósfera debido a actividades que compongan el ciclo de vida de un producto. La huella de carbono permite medir el impacto que provocan las actividades del ser humano en el ambiente, medido en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> equivalente). [26]

Las unidades de CO<sub>2</sub> equivalentes cuantifican indicadores como GWP, puesto que las emisiones de GEI están directamente relacionadas con el calentamiento global. [12] Estas unidades no solo corresponden a compuestos como el CO<sub>2</sub>, sino que también engloba otros GEI que son aún más dañinos que este, debido al tiempo de vida media en la atmósfera y su capacidad de absorción de radiación emitida por la Tierra. La Tabla 3 muestra cuál es el potencial de calentamiento global de dichos compuestos, normalizado por el GWP del CO<sub>2</sub> (igual a 1), el gas de efecto invernadero más abundante y con menor duración en la atmósfera (6 meses) [7]. En la Tabla 3, los compuestos como R22 hacia abajo corresponden a refrigerantes.

Tabla 3. Potencial de Calentamiento Global de GEI. [7]

Compuesto	GWP
CO2	1
CH4	21
N2O	310
R22	1.700
HCFC 21	210
HFC- 134 a	1.300
HFC 23	12.000
CFC 11	4.600
CFC 12	10.600

#### 2.4.2.1 Resultados: Huella de carbono del caso basal

La huella de carbono del producto en estudio se analizó en base al ciclo de vida. En la Figura 12, se presentan los resultados de la huella de carbono de 1.000 toneladas de producto líquido, considerando el Potencial de Cambio Climático cuantificado como toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas. El detalle de la cuantificación de emisiones se encuentra en el Anexo 7.2.

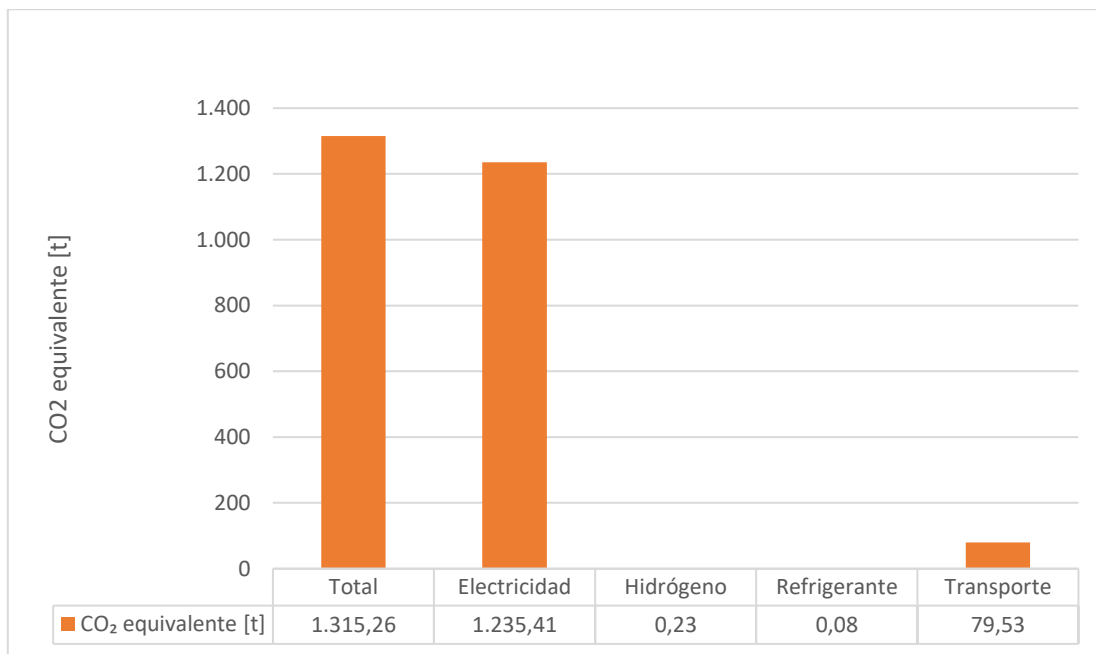


Figura 12. Huella de carbono de 1.000 toneladas de producto líquido.

#### 2.4.2.2 Discusiones

Según el reporte mundial de emisiones de GEI de la empresa, reportado durante el año 2016 con datos del 2015, se tiene que las emisiones provenientes de la producción total de Sudamérica no supera el 1% del total de emisiones de la empresa, que tiene presencia en América, Europa y Asia. De esta forma, Sudamérica alcanza el 0,4% de emisiones, equivalente a 61.560 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Comparando con el resultado del análisis, se tiene que las emisiones de la planta en estudio corresponden al 2% del total de Sudamérica, siendo un valor representativo si

se considera que es una planta de mediana escala a nivel mundial. Si este caso se observa de modo global de la empresa, el impacto de la planta en estudio no es significativo (0,009% del total de las emisiones de la empresa).

Al analizar los datos obtenidos, se tiene que la variable más intensiva en emisiones de GEI es la electricidad usada en el proceso. El impacto proviene de la combustión de hidrocarburos fósiles que corresponde a más del 50% de la matriz energética actual de la sexta región de Chile. Este tipo de fuente primaria impacta al medio ambiente tanto por emisiones de CO<sub>2</sub> como de otros GEI, tal como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que presenta una participación importante de potencial de calentamiento global, como se observa en la Figura 13 debido a la combustión y ausencia de técnicas de separación de GEI en los procesos chilenos de generación, en sintonía con los estándares nacionales.

En la Figura 13, se puede apreciar una diferencia en la generación de electricidad proveniente de hidroeléctricas, fuentes eólicas o plantas solares, donde la obtención de la energía presenta emisiones de GEI en una escala menor y la principal fuente de GWP corresponde a CO<sub>2</sub>; sin emitir significativos flujos de otros GEI. Por otra parte, el CO<sub>2</sub> emitido está relacionado con la operación de maquinarias presentes en las plantas de generación, debido a que ninguna de estas formas de energía usa combustible directamente en su operación.

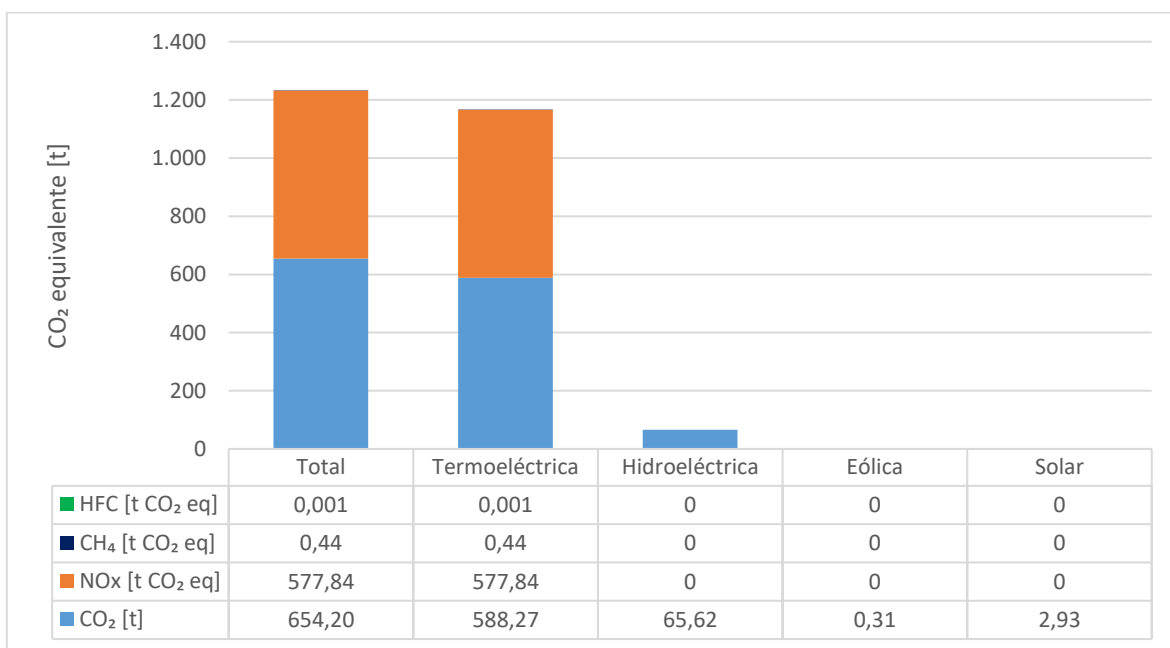


Figura 13. Huella de carbono de matriz de generación eléctrica propuesta.

Cabe mencionar, con respecto a la energía, que el análisis utilizó datos provenientes de distintas partes del mundo, puesto que los disponibles para Chile no estaban completos o no entregaban la información necesaria. Así, para la obtención de energía de fuentes hídricas y eólicas, se utilizaron datos provenientes de Brasil, debido a que no existe mayor diferencia tecnológica en la generación de energía entre países latinoamericanos. Además, al ser energías renovables, no

presentan mayor diferencia en las emisiones, no así las plantas termoeléctricas, pues las leyes de emisiones cambian dependiendo del país. Si se requiere de un análisis más cercano a la realidad, sería necesario considerar el escenario nacional y construir un inventario local de emisiones.

Con respecto a las otras variables del proceso, se utilizaron datos de la base Ecolnvent que corresponden a escenarios geográficos generales. Esto puede proporcionar desajustes con la realidad chilena o de la sexta región. Sin embargo, por la magnitud de las variables, el cambio no se estima significativo.

Otro punto a considerar es el uso de refrigerantes, pues el potencial de calentamiento global corresponde a 55 kg de CO<sub>2</sub> equivalente cada 1 kg de refrigerante utilizado. Si bien, la magnitud de uso de refrigerante es pequeña, haciendo marginal su participación en la huella de carbono, el impacto que implica la utilización de este es 50 veces mayor al uso de 1 [kWh] energía proveniente de una termoeléctrica. Esto depende directamente de qué refrigerante se use. Así, para poder disminuir la huella de carbono del refrigerante podría realizarse un cambio de compuesto o una reducción de flujo, considerando otras tecnologías que no hacen uso de refrigerantes para reducir temperatura, por ejemplo, utilización de otras corrientes frías como nitrógeno líquido.

En el futuro, es posible hacer otro análisis para estudiar el ciclo de vida de cada uno de los productos, haciendo necesario definir el consumo energético específico en la producción de los mismos. Este análisis puede entregar información valiosa si se desea aumentar o disminuir la producción de alguno de los productos, pero en este caso, no se evaluará tal cambio puesto que el estudio está enfocado en establecer un caso base para la producción general de la planta, buscando modificaciones en la operación, mantención o equipamiento que permitan reducir la emisión de GEI del proceso.

#### 2.4.3 Análisis de huella hídrica

La huella hídrica es un indicador que se define como el volumen total de agua dulce consumido tanto directa como indirectamente en la elaboración de un producto [31]. El interés por este indicador proviene del reconocimiento de los impactos en los sistemas hídricos y cuál es la relación con el consumo humano. Algunos impactos están relacionados con temas como la escasez o contaminación del agua, y estos pueden ser mejor entendidos y gestionados considerando la producción y cadenas de distribución. [32]

La metodología de cuantificación se enfocó en el estudio del ciclo de vida del producto según las indicaciones y recomendaciones entregadas por la norma ISO 14.046:2014 [33].

##### 2.4.3.1 Resultados: Huella hídrica del caso basal

En la Figura 14 se muestran los resultados de la huella hídrica de la producción de 1.000 toneladas de producto líquido medida en m<sup>3</sup> de agua dulce utilizada. El desarrollo de este ítem se encuentra en el Anexo 7.3

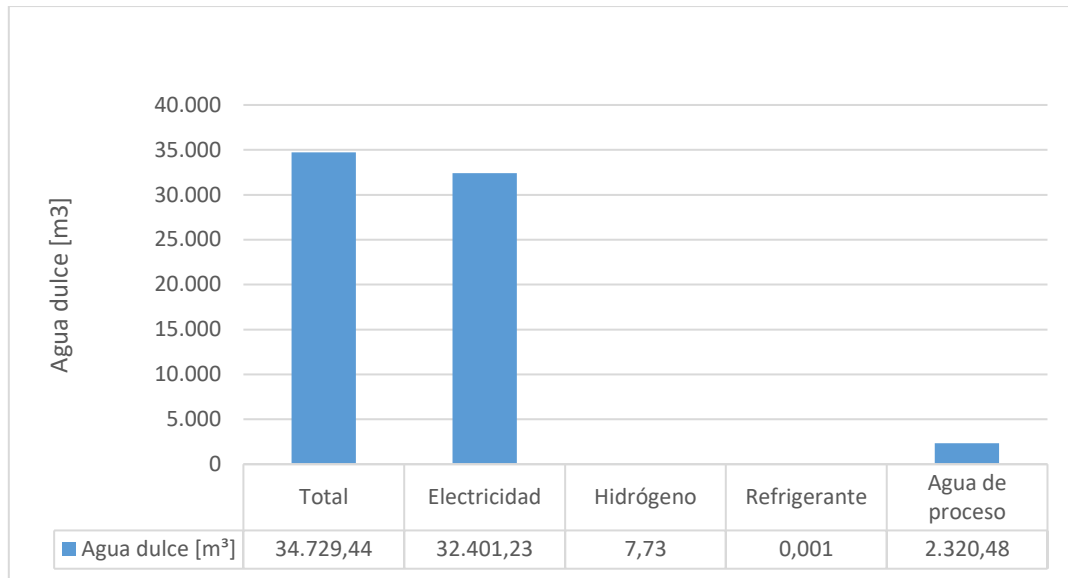


Figura 14. Huella hídrica de 1.000 toneladas de producto líquido.

#### 2.4.3.2 Discusiones

La huella hídrica calculada está basada en a datos de EcoInvent y GaBi, a fin de complementar la información de la empresa.

Es importante mencionar que análogamente la huella de carbono, los datos sobre el consumo de agua enfocados en variables propias de la región no fueron encontrados, por lo que se usaron datos generalizados con respecto a la geografía. Cabe destacar que el consumo de agua es un dato cuantificado por la empresa y no fue obtenido desde base de datos.

Se puede observar que la variable más intensiva en uso de agua dulce es la electricidad, específicamente el uso de energía proveniente de termoeléctricas, pues no se contabiliza el agua utilizada en hidroeléctricas, ya que esta es devuelta a su curso natural. Solo se consideran flujos consumidos.

Si bien el uso de electricidad es la principal causa de impacto al analizar el ciclo de vida del proceso, esta es de suma importancia, ya que los equipos requieren tal forma de energía. Realizar cambios que permitan utilizar menos electricidad o que esta provenga de fuentes renovables no convencionales tendría un impacto muy significativo en la huella hídrica del proceso.

La segunda variable que impacta en consumo hídrico, aunque con un orden de magnitud menor, es el consumo directo del proceso, debido principalmente al uso de agua para enfriar. Si bien el consumo de agua es mucho menor que el ligado al uso de electricidad, este depende completamente del proceso y su operación.

Cabe mencionar que como la planta se encuentra en la sexta región, el consumo de agua no posee restricciones por disponibilidad, ya que existen diversas fuentes. En este caso, la empresa

utiliza agua de pozo para el proceso, que ofrece una calidad suficiente para enfriar. Sin embargo, el escenario hídrico en Chile ha sufrido variaciones en los últimos años debido al cambio climático, haciendo que la obtención de agua se haga cada vez más difícil, como se observa en la Figura 15 [34]. En la sexta región, por lo tanto, las proyecciones muestran un leve excedente de agua dulce disponible en comparación con la demanda, con una tendencia a igualarse. De esta forma, se hace necesario evaluar alternativas que ayuden a reducir el consumo de agua del proceso.

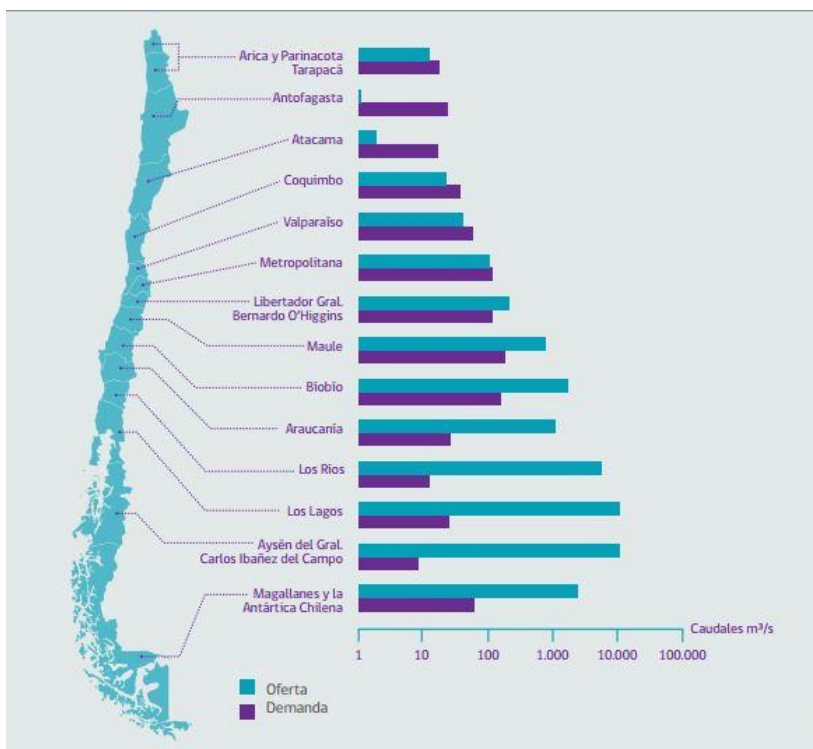


Figura 15. Disponibilidad de agua por región en Chile. [34]



### 3 Alternativas de cambio

Considerando los indicadores de huella de carbono y huella hídrica, se proponen alternativas y mejoras técnicas disponibles que sirvan para mitigar el impacto provocado. Estas alternativas se dividen en dos secciones de acuerdo al nivel de intervención: cambios tácticos que involucran métodos de eficiencia energética, con aplicación directa en el proceso; y cambios estratégicos que involucran una inversión económica mayor.

Estas alternativas se orientan a huella de carbono por sobre huella hídrica, debido a que en el ACV destaca el consumo energético como principal variable emisora de GEI, y existen diversos cambios posibles para reducir la huella de carbono en un proceso como el estudiado, mucho más intensivo en uso de electricidad que de agua.

#### 3.1 Cambios estratégicos

##### 3.1.1 Uso de energía solar en el proceso.

Como se mencionaba anteriormente, la electricidad se obtiene mayoritariamente de fuentes de carbón, lo que implica altas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y, en consecuencia, mayor huella de carbono. El Gobierno de Chile ha promulgado la Ley 20.257 de fomento de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), que obliga a empresas de energía a acreditar un mínimo de 10% de la energía inyectada a la red generada a partir de ERNC, lo que ayuda a disminuir el impacto medioambiental de la generación eléctrica. [35]

Así, se propone incorporar la producción de energía proveniente de fuentes renovables, como energía solar, que pueda abastecer parte de la demanda de planta.

En la zona central de Chile, la radiación varía según las estaciones del año, como se aprecia en la Figura 16. La generación de energía también cambia, en consecuencia, cuando depende de la radiación.

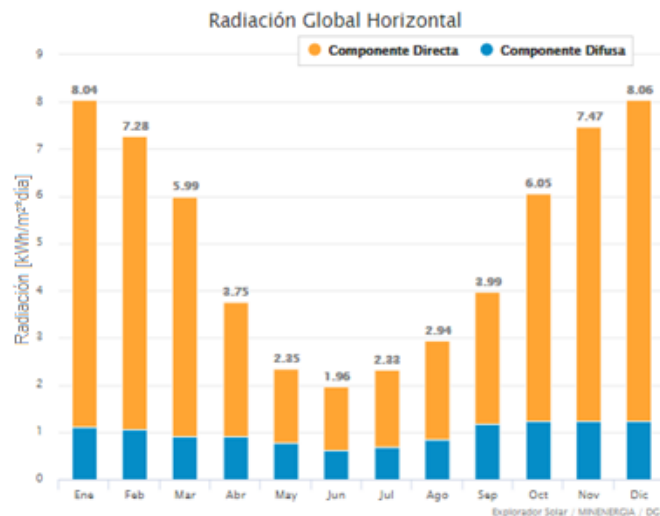


Figura 16. Radiación solar anual en la sexta región de Chile. [36]

El análisis se hará en base a un cambio parcial del suministro de la potencia instalada de la planta, evaluado en distintos escenarios, considerando los meses cuya radiación sea menor, de manera de garantizar el abastecimiento propuesto durante todo el año. El uso de paneles solares disminuiría tanto la huella de carbono como hídrica, dado que no se estaría usando energía proveniente de termoeléctricas, principal fuente emisora de GEI y uso de recursos hídricos en este contexto. Esta propuesta requiere la instalación de paneles fotovoltaicos que permitan transformar la luz solar en electricidad [37]. En la Tabla 4, se observa el número de paneles fotovoltaicos y el área que ocuparían de acuerdo a los distintos niveles de abastecimiento.

*Tabla 4. Escenarios de suministro de energía solar fotovoltaica.*

	<b>Fracción cubierta de la demanda</b>	<b>Número de paneles</b>	<b>Área ocupada [há]</b>
Escenario 1	20%	7.832	5,75
Escenario 2	15%	5.875	4,31
Escenario 3	10%	3.916	2,87

Los resultados obtenidos se estimaron utilizando datos de plantas de paneles fotovoltaicos que serán implementadas en la región en estudio. Se comparó la potencia instalada de las mismas y se determinó el número de paneles como una proporción de la potencia abastecida [38] [39], considerando que los paneles fotovoltaicos poseen una potencia de 310 [W] cada uno. Para el cálculo del área ocupada se realizó una relación análoga.

Cabe destacar que las plantas que están en instalación o se están estudiando tienen una potencia instalada de 5 a 12[MW] cada una, demostrando que la zona es un lugar apto para instalar este tipo de tecnología energética.

### 3.1.2 Alternativas de enfriamiento de agua.

La planta requiere de agua para enfriar las salidas provenientes de los compresores que se encuentran en el sistema. Este flujo de agua es enfriado en torres evaporativas previo a la entrada del proceso. Existen diversas configuraciones de este tipo de torres, y las usadas en el proceso transfieren calor mediante tiro inducido, lo que significa que el aire es succionado mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Como se observa en la Figura 17, el aire puede entrar por una o más paredes de la torre [40]. La planta, luego del uso que se le da al agua fría, recircula este insumo a las torres de enfriamiento. De esta forma, la entrada de agua desde el pozo es menor a la que se usa realmente, siendo el flujo obtenido de pozo igual a 2.320,5 [m<sup>3</sup>] por cada 1.000 [t] de producto líquido, como se observó en el análisis de la sección 2.4.3.

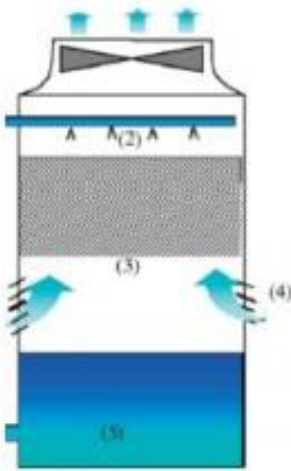


Figura 17. Torre de enfriamiento evaporativo de tiro inducido. [40]

Este tipo de torres de enfriamiento bajan la temperatura mediante la evaporación del agua, liberando al ambiente un flujo importante de este recurso. Sin embargo, el consumo energético es bajo, pues solo se cuantifica la potencia requerida por las bombas que expulsan el agua dentro de la torre y de los ventiladores, que corresponde a 33 kW según datos bibliográficos [40]. La pérdida de agua por evaporación puede ser calculada con la ecuación 1, correspondiente a una relación empírica entregada por proveedores de este tipo de equipos. [41]

$$Tasa\ de\ evaporación\ \left[ \frac{m^3}{día} \right] = Flujo\ [gpm] * \Delta T * tiempo\ de\ funcionamiento\ por\ día[h] * 0,00023 \quad Ec. 1$$

De esta forma, se estima que la pérdida de agua corresponde a un 81,5% del agua fresca que se consume. Cabe mencionar que este valor puede presentar un error significativo si la torre real no sigue el mismo comportamiento de la torre estudiada en bibliografía, haciendo necesario un diagnóstico detallado.

Otras plantas de la misma empresa poseen un tipo de torres de enfriamiento diferente, pues están situadas en zonas donde la obtención de agua dulce es acotada, como la segunda región de Chile. El sistema que está en operación en tal región corresponde a una torre de enfriamiento cerrada, es decir, sin evaporación libre al ambiente y funciona mediante intercambiadores de platos que, en contacto con aire inyectado perpendicularmente con un ventilador, enfría el agua contra temperatura ambiente, tal como se muestra en la Figura 18. [42]

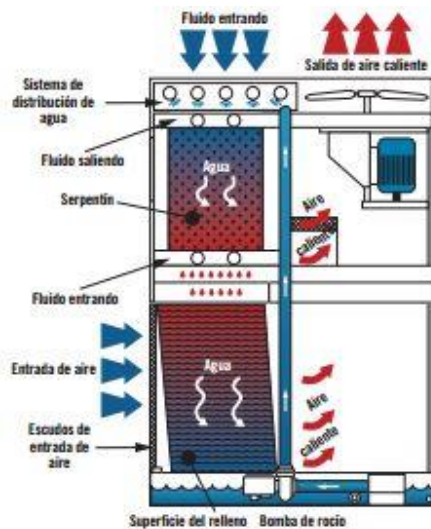


Figura 18. Torre de enfriamiento con circuito cerrado. [41]

En este tipo de torres no existiría pérdida de agua durante el enfriamiento, por lo que solo se requeriría de un tratamiento adecuado. De esta forma, el uso de agua sería de 430 [m<sup>3</sup>] para obtener 1.000 toneladas de producto, lo que corresponde al 19% de lo usado actualmente.

Además, analizando el caso de la planta que se conoce en la segunda región, se tiene que la potencia de la torre es de 48 kW, y para llevarlo al caso estudio basta con reconocer la diferencia en las capacidades de la planta, permitiendo estimar la necesidad de 2 torres de enfriamiento con las características mencionadas. La potencia consumida en el caso de estudio ascendería a 96 kW.

Existe otro tipo tecnología más eficiente para el enfriamiento de agua: las torres híbridas. Estos equipos incorporan un sistema evaporativo cerrado, donde el agua se enfría por evaporación y por contacto con un intercambiador que posee un fluido refrigerante. En la Figura 19, se puede observar el funcionamiento de estas torres que permiten reducir tanto la pérdida de agua como el consumo energético. [42]

Sin embargo, las torres híbridas requieren de mayor estudio, pues no se conoce las temperaturas de operación, haciendo imposible determinar si el equipo cumplirá la función deseada ni el consumo energético de la operación. El análisis de esta tecnología queda propuesto a la empresa, constituyendo una alternativa atractiva en un escenario donde se requiera invertir en cambios tecnológicos.

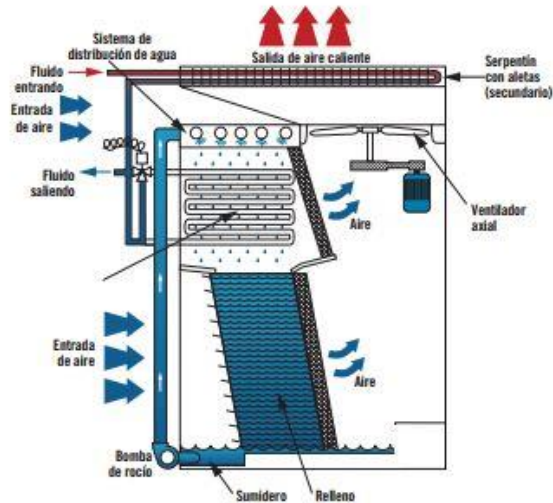


Figura 19. Torre de enfriamiento híbrida. [42]

## 3.2 Cambios tácticos

### 3.2.1 Alternativas orientadas al cambio de maquinaria.

Como se ha podido rescatar de los resultados de impacto ambiental, el mayor impacto en huellas de carbono e hídrica proviene del consumo de electricidad. Luego de analizar los consumos energéticos de los equipos que se presentan en el proceso, se obtiene que el 80% corresponde al uso del compresor de aire, vital en el proceso, y al uso del compresor para la licuación de nitrógeno.

La planta en estudio entró en operación el año 1961, y desde ese entonces no ha sufrido cambios estructurales [43]. Considerando que la vida útil de los equipos es de 20 años [28], los equipos solo han sido modificados mediante la instalación de repuestos [43].

Los avances tecnológicos han permitido desarrollar equipos que optimizan variables, como energía, agua o insumos. En el área de los compresores, es de suma importancia el manejo de la energía, pues el trabajo realizado por el equipo aumenta junto con el flujo que se requiere tratar y varía con el aumento de la presión del gas, siguiendo curvas específicas de operación.

En el proceso pueden existir dos compresores que traten el mismo flujo de gas y logren el aumento de presión deseado, pero consuman potencias diferentes. Luego de realizar un *benchmarking* de tecnología en compresores con especificaciones similares a los usados actualmente, se encontraron modelos alternativos que presentan un menor consumo energético, comparadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de compresores usados y propuestos.

Equipo	Modelo Actual			Modelo Propuesto [44] [45]		
	Flujo [m <sup>3</sup> /min]	Presión de descarga [bar]	Potencia [kW]	Flujo [m <sup>3</sup> /min]	Presión de descarga [bar]	Potencia [kW]
Compresor de aire	210	6,35	1.500	250	7	1.313
Compresor de nitrógeno	415	27,8	2.070	450	27,8	1.815

Por otra parte, durante los últimos años se han diagnosticado oportunidades de ahorro de energía en compresores, aprovechando su calor emanado. La compresión de aire aumenta su temperatura luego de cada etapa, haciendo necesario su posterior enfriado en intercambiadores de calor con agua, permitiendo que el compresor realice un trabajo óptimo. Este aumento de temperatura está en el rango de 80 [°C] [46], con una potencia entregada de 280 [kW]. Considerando que son tres etapas de extracción de energía, la potencia asciende a 868 [kW].

Sin embargo, este calor puede ser transformado en otro tipo de energía o en electricidad mediante un ciclo binario. Esta tecnología consiste en absorber el calor con un fluido refrigerante en circuito cerrado, para luego transformarlo en electricidad mediante un motor, tal como se observa en la Figura 20. [47]

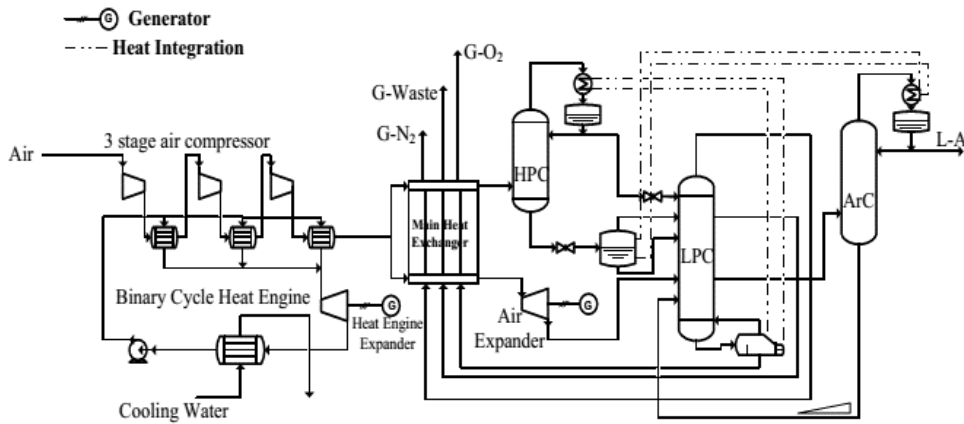


Figura 20. ASU con recuperación de energía integrada en compresor. [47]

Si se considera una eficiencia del 80% tanto en la expansión y el funcionamiento de la bomba, se tendría una potencia generada por el ciclo binario de 555,5 [kW], que corresponde al 37% de la potencia total consumida por el compresor. Además, este cambio provocaría un ahorro en uso de agua del 33% del agua total consumida por la planta, puesto que ya no se utilizaría para enfriar el aire a la salida de cada etapa de compresión. Este cálculo puede ser extendido al compresor de nitrógeno. No obstante, no se dispone de datos termodinámicos de las salidas de cada etapa del compresor, por lo que se deja propuesto el estudio de factibilidad. Cabe mencionar que el estudio no considera el consumo energético de la bomba ni del motor.

Esta última opción no ha sido implementada aún, y los resultados obtenidos han sido contruidos sobre supuestos y simulaciones computacionales. Esto dificulta la implementación inmediata, pero ayuda a distinguir puntos de mejora en relación a huella de carbono y huella hídrica.

Así, los cambios de maquinarias propuestas se resumen en cambiar compresores por modelos actuales. Los equipos a cambiar serían el compresor de aire y el compresor de nitrógeno.

### 3.2.2 Estudio de detenciones de la planta

La operación de la planta se ha llevado a cabo de forma continua desde su instalación, ajustando el flujo de entrada de aire a procesar para obtener la producción deseada. Esto cambió durante el año 2016 y actualmente se opera la planta al máximo de capacidad hasta completar un stock definido, para luego detener la planta hasta que sea necesario volver a producir [43]. Así, las detenciones de planta son más frecuentes, aunque no se cuenta con el dato.

Las detenciones de planta provocan días sin producción durante la puesta en marcha, puesto que los equipos de expansión requieren llegar a temperaturas bajas, que se logran en un tiempo estimado de 24 horas. [43]

Se desea comparar, entonces, el consumo energético en estos dos regímenes de operación continuo o con detenciones. El consumo de agua no se considerará en esta ocasión, puesto que no se tienen datos suficientes.

En la Tabla 6, se tienen datos de consumo energético con respecto al caso basal de 1.000 toneladas de producto líquido. De esta forma se mantiene la confidencialidad de los datos reales de la empresa. Se considerarán datos de meses específicos antes y después del cambio, para mantener las condiciones climáticas, que condicionan los consumos de energía y agua.

Tabla 6. Comparación de consumo de electricidad en función al modo de operación de la planta.

	Operación continua	Detenciones de planta intermedias
	Electricidad [kWh]	Electricidad [kWh]
Mes 1	931.920	846.749
Mes 2	909.737	940.955

Como se puede observar en la Tabla 6, no existe relación significativa entre ocupar la planta en continuo o realizar detenciones intermedias de la planta, presentando una variación menor al 10%. Esto implica que el impacto relacionado es similar en ambas opciones, concluyendo que el régimen de operación no modifica la huella hídrica y de carbono de forma importante.

### 3.2.3 Versión economizadora de Chiller.

El *chiller* corresponde a un equipo de climatización que permite enfriar o calentar un flujo. En el caso de estudio, el *chiller* se utiliza para mantener el refrigerante Freón frío mientras este enfría una corriente de agua, usada como medio de enfriamiento de gases a la salida de la etapa de compresión del proceso, como se observa en el Anexo 7.1.

A modo de contextualización, el funcionamiento de un *chiller* consiste en que el agua a enfriar circula a través de un intercambiador para transferir calor al refrigerante. Con este calor, el refrigerante se evapora en condiciones de baja presión. Luego, existe una etapa de compresión que permite preparar al refrigerante gaseoso para una etapa de condensación posterior, calentándolo durante la compresión y con el calor del motor del compresor. En el condensador, el calor del gas caliente es transmitido a un medio refrigerante, que bien puede ser agua o aire, provocando la condensación del refrigerante a alta presión. El refrigerante en estado líquido a alta presión puede ser almacenado o enviado directamente a la válvula de expansión para su inyección en el evaporador y así reiniciar el ciclo. En la Figura 21 se puede observar el diagrama de flujos de un *chiller* estándar. [48]

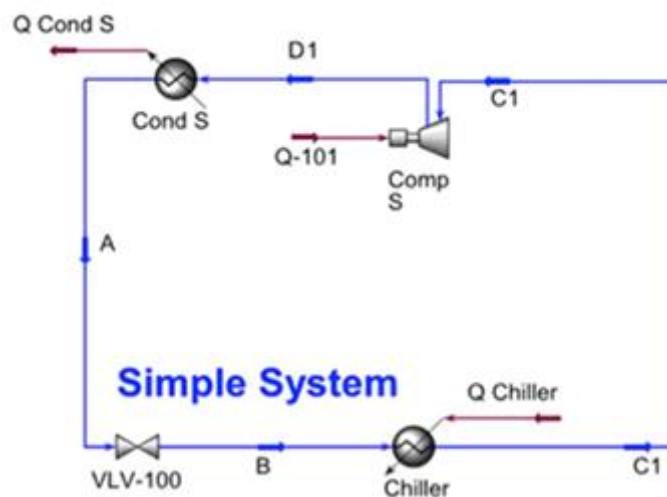


Figura 21. Diagrama de flujos de un *chiller* estándar. [48]

Sin embargo, existe una configuración que permite ahorrar en uso de refrigerante y energía. En ella el vapor frío del evaporador (C1) se emplea para sub-enfriar el refrigerante saturado (A) utilizando un intercambiador. En la Figura 22 se puede observar el diagrama de flujos de un *chiller* economizador. [48]



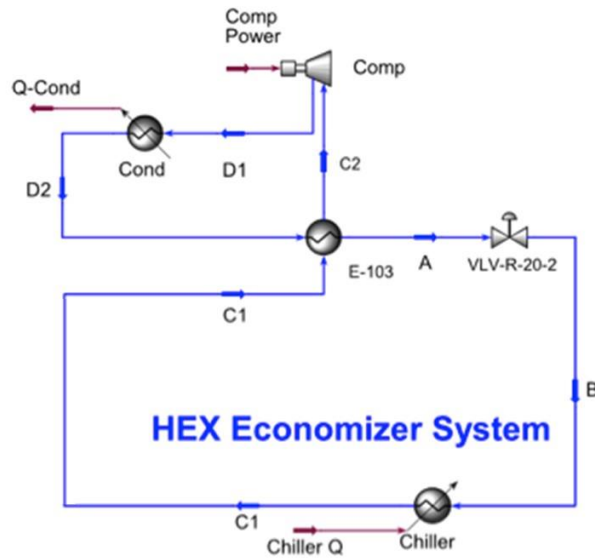


Figura 22. Diagrama de flujos de un chiller economizador. [48]

Para poder acceder a esta modificación en el equipo, se requiere contactar al proveedor del mismo. Sin embargo, el *chiller* de la planta es tan antiguo como ella, y en consecuencia no está disponible, el modelo, debido a los cambios del proveedor (Linde). [43]

Mediante bibliografía, es posible analizar cuál sería el ahorro de energía al incorporar este cambio. Al realizar este cambio en el circuito, se estima una diferencia en el consumo de energía dependiendo de cuál es la temperatura de salida del intercambiador que se requiera. En la Tabla 7 se encuentran los datos que se obtuvieron para ese estudio en particular y el caso en detalle se presenta en el Anexo 7.4.

Tabla 7. Potencia del compresor de un chiller con respecto a temperatura de aceite sub-enfriado. [48]

Temperatura sub-enfriada [°C]	Potencia compresor [kW]
33	1.795
30	1.780
27	1.765
24	1.750

Es de mucha importancia recalcar que el estudio solo entrega una imagen de lo que podría ocurrir al instalar la versión economizada del *chiller*, ya que el proceso estudiado es diferente. Por ende, las condiciones de operaciones también difieren, incluyendo tipo y magnitud de flujo a tratar, tipo de refrigerante y temperaturas de operación.

Para obtener el análisis del caso de estudio se requiere el conocimiento del valor de ciertas variables y parámetros, los que se mencionan a continuación:

- Flujo de agua que se requiere enfriar con el *chiller*.
- Flujo de refrigerante que se utiliza.
- Presión o temperatura de operación de salida del compresor (Flujo D1). Otra variable que cumple la misma función corresponde al trabajo efectivo realizado por el compresor.
- Presión o temperatura de operación del condensador (Flujo D2). Otra variable que cumple la misma función corresponde al calor entregado por condensación.
- Presión o temperatura de operación de salida del expansor (Flujo B).
- Diferencias de temperaturas de agua o refrigerante en *chiller*.

Cabe mencionar que, de obtener la información del proveedor del *chiller* y resultar de bajo costo monetario la instalación de la versión economizadora, no sería necesario realizar el estudio, ya que la instalación de esta modificación en el *chiller* trae como consecuencia un ahorro energético garantizado. [43]

#### 3.2.4 Cambio de refrigerante

En marzo del 2006 entró en vigencia la Ley N° 20.096, también conocida como “Ley Ozono”, que establece mecanismos de control aplicables a todas las sustancias agotadoras de ozono (SAOs) y medidas de evaluación, prevención y protección frente a la radiación ultravioleta. [49]

La “Ley Ozono” se enmarca en el Protocolo de Montreal de 1989 [50], teniendo como principal objetivo regular el consumo y la producción de SAOs. Existen diversos tipos de refrigerantes que corresponden a SAOs, presentando diferentes potenciales de calentamiento global (ver Tabla 3). El Gobierno de Chile ha desarrollado planes que permiten disminuir el uso de estas sustancias hasta llegar a su futura eliminación. En el año 2012, se implementa el Plan Terminal de CFCs (Clorofluorocarbonos) [50], eliminando el uso permanente de estas sustancias, y actualmente está en vigencia el Plan de Gestión para la Eliminación de HCFCs (Hidroclorofluorocarbonos), que espera disminuir en un 65% su uso al 2021 y terminar con este hacia el año 2030. [50]

El refrigerante usado en el proceso corresponde al Freón R22 o HCFC 22, uno de los más comunes en la industria [51]. Se utiliza para enfriamiento de agua usada en la etapa de compresión. Es de suma importancia utilizar un fluido que permita disminuir un intervalo de temperatura dado, siendo el uso de refrigerantes la opción más frecuente y económica. Sin embargo, se sabe que son sustancias con alto potencial de calentamiento global, por ejemplo, el Freón R22 tiene un GWP de 1.700.

Existen alternativas que reemplazan el R22 con menor potencial. Para ejecutar el cambio, se debe considerar un cambio de equipamiento, pues estas sustancias no operan en igualdad de condiciones, obteniendo resultados diferentes entre un refrigerante y otro. En la Tabla 8 se presentan tres alternativas de refrigerante, comparando ventajas y desventajas con respecto al R22 [51].

Tabla 8. Comparación entre alternativas de refrigerantes [51].

Refrigerante	Tipo	Ventajas	Desventajas
R134a	HFC	- Menor GWP (1.300) - Altamente usado a nivel industrial	- Cambio de equipo
R410a	HFC	- Mayor eficiencia de enfriamiento - Usado a nivel industrial	- Mayor GWP (1.975) - Cambio de equipo
R290	HC	- Menor GWP (3) - Mismo equipo (igualdad en condiciones de operación) - Mayor eficiencia de enfriamiento	- Inflamable - No es usado a nivel industrial

De esta forma, se decide evaluar un *chiller* que permita la utilización de R134a y/o R410a con una potencia de 30,6 [kW], debido a que no es posible encontrar un refrigerante comercial que sustituya el R22 sin tener que realizar un cambio en el equipo. Se analizará el impacto de ambos refrigerantes en un mismo compresor y además se evaluará un *chiller* que solo permita el uso de R134a, con un consumo de 22,5 [kW] [52].

Como se mencionó anteriormente, la diferencia de eficiencias implica un cambio en el flujo de refrigerante a usar. En esta ocasión, se decide evaluar el mismo flujo que se utiliza para el R22, debido a que la magnitud de esta variable es pequeña, pudiendo significar un error menor en el análisis.

### 3.2.5 Uso de nitrógeno como refrigerante

Como se ha estudiado anteriormente, el proceso utiliza un *chiller* que enfría agua mediante el uso de Freón R22, para disminuir la temperatura de salida del aire desde el compresor. Este último paso puede ser diferente en otras plantas del mismo rubro, dando paso a la existencia alternativas que permitan disminuir la huella de carbono del caso actual.

La empresa cuenta con plantas a lo largo de Chile y se adecua la tecnología utilizada en cada una dependiendo de la disponibilidad de recursos, como el agua.

Existe una planta que tiene una variación en la operación del *chiller*, correspondiente a enfriar el aire directamente con agua fría, proveniente de torres de enfriamiento y una torre de transferencia de calor con nitrógeno que sale del intercambiador principal de la planta [43]. Sin embargo, esta alternativa trae problemas relacionados con la saturación de agua, afectando la etapa de purificación con columnas de absorción, que debe tener mayor magnitud o realizar un cambio en el manejo de tiempos de recuperación. Esto implica un gasto de energía mayor, haciendo necesario realizar estudios para determinar el punto óptimo.

Por otra parte, se puede observar otra alternativa que proviene de un proceso similar, correspondiente a la licuación de helio. En este proceso, existe una etapa de enfriamiento que utiliza el cambio de fase del nitrógeno líquido.

Se estudia la factibilidad de esta última alternativa, que se puede llevar a cabo de dos formas: la primera opción es enfriar aire en un intercambiador de calor con agua, proveniente de un

circuito cerrado, siendo esta enfriada en otro intercambiador de calor con un refrigerante, como es el caso actual, o con nitrógeno líquido; la segunda opción es enfriar el aire directamente con nitrógeno líquido en un intercambiador. Se estudia cuál sería el flujo de nitrógeno necesario y el área de transferencia del intercambiador.

Para realizar el estudio, fue necesario tomar algunas consideraciones que se presentan con detalle en el Anexo 7.5, pues no se tiene la totalidad de los datos de la etapa. Uno de los supuestos más significativos corresponde a considerar que la transferencia de calor ocurre por evaporación del nitrógeno líquido y se alcanza una diferencia de temperatura en el nitrógeno de 100 [°C] con respecto a la entrada. Al no considerar esto último, el flujo de nitrógeno aumenta considerablemente y, en consecuencia, aumenta el área del intercambiador.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 9 y el detalle del cálculo se encuentra en el Anexo 7.5.

*Tabla 9. Alternativas de transferencia de calor con nitrógeno líquido.*

	<b>Flujo de nitrógeno [kg/h]</b>	<b>Área de intercambiador [m<sup>2</sup>]</b>
Opción 1	341	2,77
Opción 2	273	3,17

La principal diferencia entre las configuraciones estudiadas radica en el coeficiente de global de transferencia de calor, puesto que el agua posee mayor capacidad para entregar calor que el aire. Por otra parte, el flujo de nitrógeno requerido cambia ya que difiere el número de pasos utilizados para enfriar, puesto que en la opción 1 el agua enfría al aire, requiriendo un intercambiador más (que ya existe en la empresa, pues ese es el procedimiento actual), lo que implica una eficiencia menor, y por lo tanto un mayor flujo de nitrógeno.

Un punto importante a considerar es que la empresa debe producir el nitrógeno líquido que se ocuparía en esta etapa, lo que se ve reflejado en un consumo de energía mayor. No obstante, la empresa cuenta con un nivel mínimo de almacenamiento de productos y, además, existe una corriente de venteo de nitrógeno que podría utilizarse [43]. Este punto no se considerará y se asumirá que el nitrógeno es un insumo que debiese ser costeado de forma similar como se debe costear el uso de refrigerantes. Este hito puede ser significativo en el estudio, dejando propuesto si se desea realizar la alternativa de cambio.

Debido a la abundante utilización de supuestos, esta es la alternativa con más grados de libertad, provocando mayor incertidumbre sobre su veracidad. De esta forma, se sugiere realizar un segundo análisis que incorpore algunas variables que permitan obtener un resultado que muestre la situación real de la planta.

## 4 Evaluación de alternativas de cambio

La evaluación de las alternativas, tanto ambiental como económica, se realizó analizando el potencial de disminución de impacto. Las alternativas que se evaluarán se mencionan a continuación, considerando aquellas técnicamente factible:

- Cambios estratégicos
  - Alternativa E.1: Uso de energía solar en el proceso.
  - Alternativa E.2: Torre de enfriamiento cerrada.
- Cambios tácticos
  - Alternativa T.1: Recambio tecnológico en compresores
  - Alternativa T.2: Cambio de *chiller* solo uso de R134a.
  - Alternativa T.3: Cambio de *chiller* uso R134a.
  - Alternativa T.4: Cambio de *chiller* uso R410a.
  - Alternativa T.5: Uso de nitrógeno como refrigerante

### 4.1 Evaluación ambiental

Para realizar el análisis ambiental se tuvieron las siguientes consideraciones con respecto a las alternativas:

- Para el uso de energía solar, se consideró un caso de suministro del 10% y se incorpora la huella de carbono de los paneles fotovoltaicos, correspondiente a las emisiones de CO<sub>2</sub> de la potencia consumida, al igual que la huella hídrica. Es así como las huellas de 1kW generado con energía de paneles fotovoltaicos son 0,07 [kg CO<sub>2</sub>] y 5,76\*10<sup>-4</sup> [m<sup>3</sup>]de agua. No se considera la construcción de los paneles debido a su vida útil, que equivale a 10 años según la base de datos estudiada.
- Para las alternativas de enfriamiento de agua se consideró el caso de una torre de circuito cerrado, puesto que es una alternativa que está incorporada en una planta de la misma empresa. El tipo híbrido no se considera debido a que no se encontró información bibliográfica sobre la utilización de estas tecnologías en industrias de magnitudes similares a la que se está estudiando.
- Con respecto al uso de nitrógeno con refrigerante, se consideró la opción de enfriar el aire directamente con una corriente de nitrógeno líquido en un intercambiador, ya que optimiza el uso de este componente.

En la Figura 23 se presenta la comparación de la huella de carbono del proceso al realizar los cambios propuestos. Cabe mencionar que los datos se obtuvieron desde la misma base de datos usada en el caso basal, EcoInvent v3.3 2016.

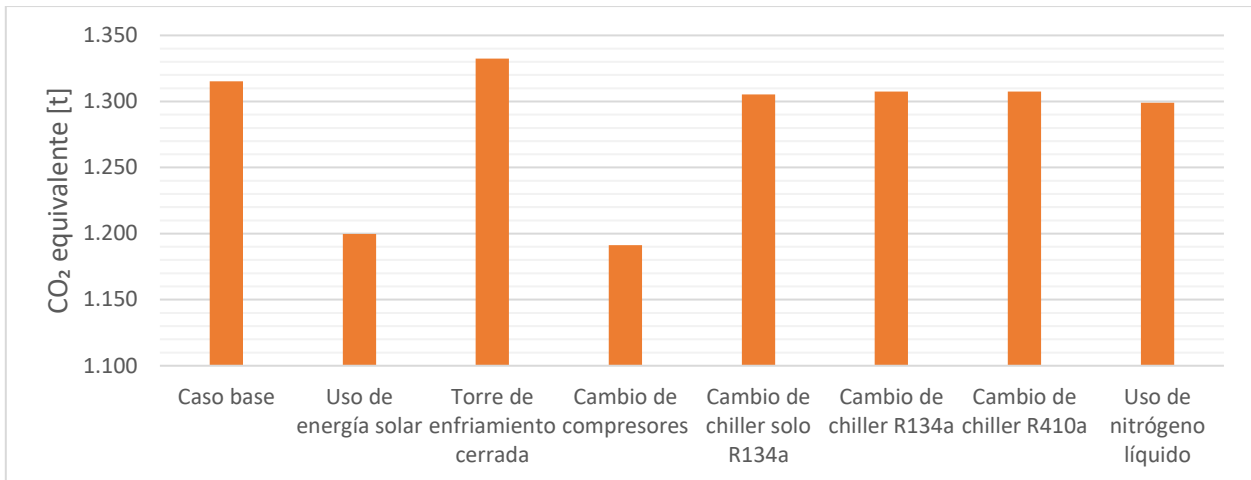


Figura 23. Cambio en la huella de carbono del caso basal con respecto a las alternativas.

En relación a la huella de carbono, la alternativa de torre de enfriamiento propuesta incrementa el impacto de emisiones de GEI, debido a que consume más electricidad que la actual.

Las alternativas que reducen significativamente el impacto del proceso con respecto a emisiones de GEI son la instalación de paneles fotovoltaicos, debido al cambio de fuente energética, y el recambio de compresores, debido a la relación directa con la disminución de potencia consumida. Estas alternativas representan una disminución en la huella de carbono de 8,77% y 9,59% respectivamente.

Con respecto al cambio de *chiller* usando otro refrigerante, se puede observar que la diferencia del potencial de calentamiento global no es significativa en el análisis, debido a que al usar R134a o R410a, con una diferencia de GWP de 675, no se observa una diferencia significativa en la huella de carbono. Esto se debe a que los refrigerantes son tratados como residuos peligrosos y para disponer de ellos se requiere un tratamiento químico o físico. De esta forma, no impactan directamente en el medio ambiente, siendo despreciable el cambio de GWP. De esta forma, el cambio en impacto ambiental representativo corresponde al ahorro energético de las alternativas.

Se puede decir que la disminución de las otras alternativas no es significativa, ya que representan un cambio menor al 1% de huella de carbono. Sin embargo, ese 0,58% en reducción de huella de carbono significa un cambio de 1.820 tubos fluorescentes a tecnología led [53]. Esto sirve para dimensionar cuál es el impacto real del proceso y que cualquier cambio, aunque parezca pequeño en magnitud, ayuda a reducir el impacto ambiental en el planeta.

En la Figura 24 se observa la comparación del impacto de la huella hídrica de las alternativas con respecto al caso basal de estudio, siguiendo la misma lógica anterior.

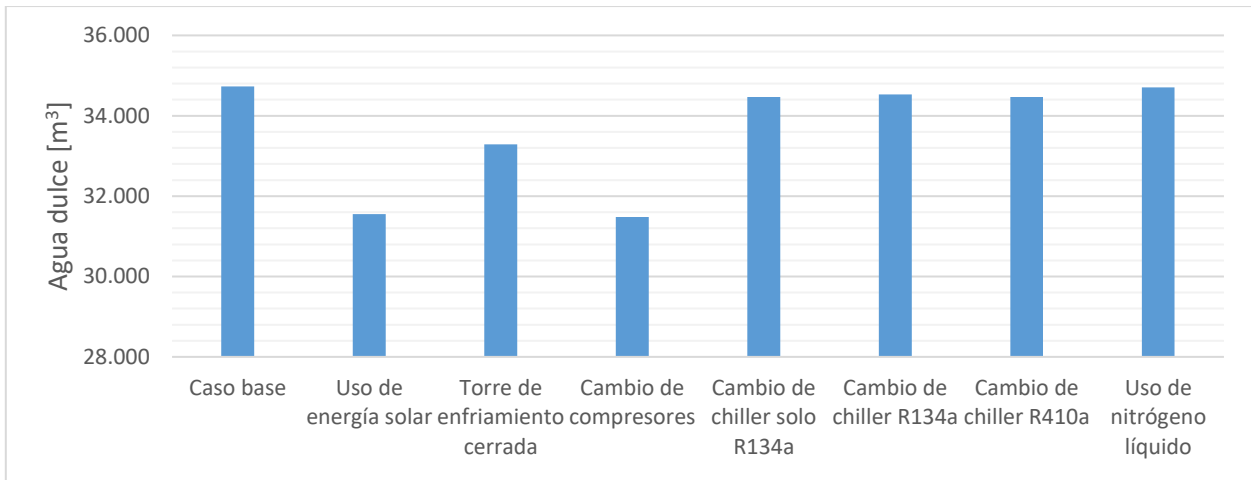


Figura 24. Cambio en huella hídrica del caso basal con respecto a las alternativas.

Las alternativas estratégicas disminuyen la huella hídrica del proceso, donde la incorporación de paneles fotovoltaicos la disminuye en un 9,16% y el cambio de torre de enfriamiento en un 5,36%. Entre los cambios tácticos, solo representa un impacto positivo en la huella hídrica realizar el cambio de compresores en el proceso, provocando una disminución del 9,37% en el uso de agua.

En relación al cambio de torre de enfriamiento, se puede analizar que la opción adecuada va a depender de las condiciones climáticas y del escenario en que se encuentre el proceso. Si fuese necesario reducir el consumo de agua, esta sería una opción válida.

A modo de conclusión, las alternativas que reducen el impacto ambiental del proceso influyendo de manera importante en las huellas de carbono e hídrica corresponden a la incorporación de energía solar fotovoltaica en el proceso y el cambio de compresores por modelos más actuales.

#### 4.2 Inversión económica de las alternativas

Se analizó la inversión requerida para incorporar las alternativas en el proceso. Se determina que solo se evaluará la utilización del *chiller* que trabaja con R134a puesto que consume menor potencia, dejando fuera la alternativa de usar un *chiller* que pueda utilizar más de un refrigerante.

A continuación, se observa en la Tabla 10 el costo de inversión de la adquisición de nuevos equipos para llevar a cabo las mejoras propuestas. Cabe destacar que el costo de las alternativas está calculado en base a los datos de la empresa sin normalizar. Esto quiere decir, que no están en base a la unidad funcional, sino que a la producción real de la empresa.

Tabla 10. Costo inversión de las alternativas en MUSD

Alternativa	Costo inversión [MUSD]	
Uso de energía solar [38]	1.250	
Torre de enfriamiento cerrada [54]	600	
Cambio de compresores	Compresor de aire [44]	365
	Compresor de nitrógeno [44] [45]	700
Cambio de <i>chiller</i> solo R134a [52]	85	
Uso de nitrógeno líquido [55]	20	

Con respecto a los costos de inversión, se recomienda contactar con proveedores directamente relacionados con la empresa para obtener datos que se ajusten con la realidad de esta. No obstante, el análisis se realizó considerando los valores más altos encontrados en portales públicos de venta de equipos de escala similar al proceso estudiado.

Al analizar los costos de inversión encontrados, se observa que la generación de energía solar fotovoltaica es la alternativa que requiere una mayor inversión monetaria, siguiendo el cambio de los compresores. Esta situación no concuerda con lo esperado, puesto que, según antecedentes, el cambio de compresores no debía superar el costo de comprar torres de enfriamiento. Sin embargo, esto puede estar sujeto a las fuentes utilizadas o a que no se consideró el costo de dismantelar las torres existentes.

Aun así, se mantendrá la decisión de evaluar las dos alternativas estratégicas en escenarios separadas, debido al esfuerzo físico y temporal que implica su instalación, en particular las torres de enfriamiento, puesto que ocupan un área considerable en la planta.

El costo del compresor de nitrógeno fue calculando usando relaciones que permitieran encontrar un valor considerando las condiciones de operación y el flujo a tratar, ya que no se logró obtener información sobre el costo real. Por esta razón, es el cambio con mayor incertidumbre dentro del análisis económico.

### 4.3 Evaluación de escenarios mixtos

Siguiendo lo mencionado anteriormente, se evaluaron cuatro escenarios, incluyendo tres alternativas de cambio cada uno. En la Tabla 11 se muestra una matriz de las alternativas que permite identificar los escenarios escogidos para realizar el análisis, señalando la inversión y la reducción de impacto ambiental correspondiente.

Se tienen dos alternativas que son excluyentes, siendo estas el cambio de refrigerantes y uso nitrógeno líquido como refrigerante, puesto que esta última reemplaza la utilización de un *chiller* y refrigerante. Por esta razón, se decide evaluar dos escenarios diferentes, considerando el cambio de compresores y una de las opciones de refrigeración. La alternativa de cambio de compresores se incorporó en todos los escenarios analizados debido a que provoca la disminución de impacto más significativa y es viable en el mediano plazo, debido a que los equipos debiesen ser cambiados luego de finalizada su vida útil.



Si bien, las alternativas estratégicas no son excluyente, se tiene que ambos cambios consideran una inversión económica mayor. En el caso de usar energía solar, se requiere instalar paneles en un área importante y en el caso de la torre de enfriamiento, se requiere cambiar las existente e instalar nuevas, teniendo en consideración que estos equipos no suelen cambiarse debido a su magnitud. Se decide plantear escenarios donde estas alternativas sean excluyentes, mostrando una situación más cercana a realidad.

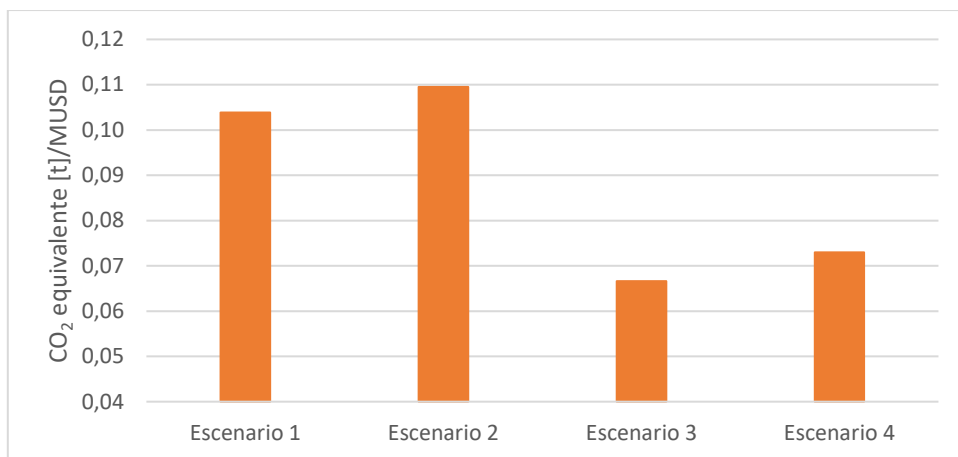
*Tabla 11. Identificación de escenarios.*

Alternativa	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
	1	2	3	4
Instalación de paneles fotovoltaicos	✓	✓	✗	✗
Torre de enfriamiento de circuito cerrado	✗	✗	✓	✓
Cambio de compresores	✓	✓	✓	✓
Chiller con uso de R314a	✓	✗	✓	✗
Intercambiador con nitrógeno líquido	✗	✓	✗	✓
<b>Inversión del escenario [MUSD]</b>	<b>2.400</b>	<b>2.335</b>	<b>1.750</b>	<b>1.685</b>
<b>Reducción en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente [t]</b>	<b>249</b>	<b>256</b>	<b>117</b>	<b>123</b>
<b>Reducción en uso de agua dulce [m<sup>3</sup>]</b>	<b>6.801</b>	<b>6.556</b>	<b>5.001</b>	<b>4.756</b>

Al analizar el ámbito económico, el escenario 4 es el que requiere menor inversión. No obstante, el escenario 3 es superior, solo en un 4%.

Si se analiza la arista ambiental, se tiene que el escenario 1 es el más favorable en la disminución de huella hídrica y el escenario 2 es la mejor solución con respecto a huella de carbono, presentando pequeñas diferencias entre estos, siendo un 4% en huella hídrica y un 3% en huella de carbono. Que estos escenarios sean los más favorables ambientalmente se debe a la instalación de paneles solares, ya que disminuye directamente el uso de energía de fuentes no renovables, siendo este el principal impacto del proceso.

Para determinar cuál escenario es más favorable tanto ambiental como económicamente, se evaluaron mediante un rendimiento de impacto versus inversión, analizando cuánto cuesta la disminución de huella de carbono y de huella hídrica. De esta forma, se hace posible obtener un análisis más complejo y permite tomar decisiones con respecto a los escenarios incorporando las medidas más eficientes. En la Figura 25 se presenta el resultado de disminución de huella de carbono del proceso en función a la inversión de cada uno de los escenarios, también a modo de rendimiento ambiental/económico.



*Figura 25. Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente disminuidas por 1 [MUSD] invertido en cada escenario con respecto a 1.000 toneladas de producto líquido.*

Dados los resultados obtenidos, se puede determinar que el escenario 2 presenta la mayor eficiencia entre huella de carbono disminuida e inversión, siendo esta igual a 0,11 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por cada 1 MUSD invertidos. Hay que mencionar que es uno de los escenarios de mayor inversión monetaria, pero al ponderar el impacto que ejerce sobre el proceso, resulta ser una de las opciones más eficientes. En este análisis, existe una gran diferencia entre el escenario más y menos favorable, puesto que la opción 3 presenta una eficiencia menor a 0,07 [toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente/MUSD], siendo un 34% menor que el escenario 2.

En este caso, el análisis de huella de carbono concuerda con los resultados obtenidos al tener en cuenta la inversión, resultando el escenario 2 la opción más conveniente. Si bien, la inversión del escenario 4 es aproximadamente un 25% menor, esta no es tan eficiente efectuando un impacto positivo en el medio ambiente, puesto que, si se realizara la misma disminución de huella de carbono que en el escenario 2, se deberían invertir alrededor de 3.500 MUSD, es decir, más de 1.000 MUSD extra.

Se podría tomar una determinación inmediata considerando que el impacto mayor de la planta es el consumo energético, pero estos resultados podrían variar considerablemente al analizar la huella hídrica, por lo que es necesario evaluar el uso de agua versus la inversión de los escenarios para tomar una decisión más certera.

En la Figura 26 se presenta el resultado de evaluar la disminución de huella hídrica del proceso en función a la inversión de cada uno de los escenarios.

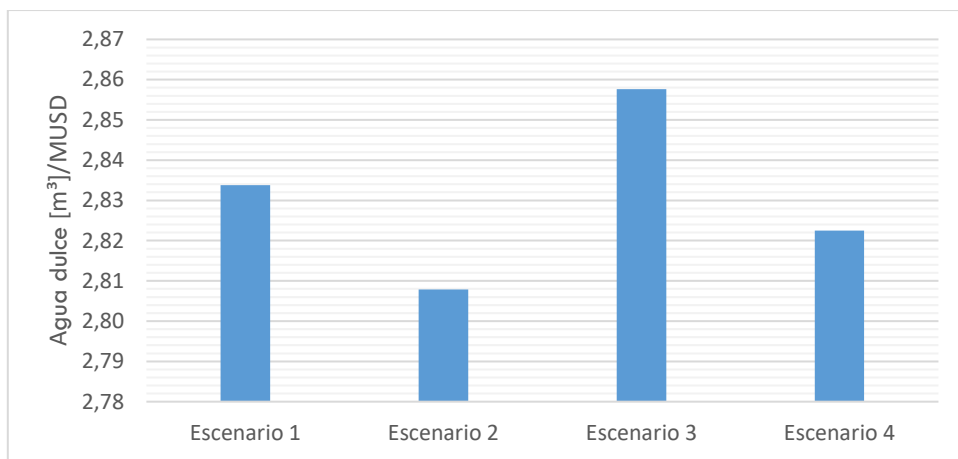


Figura 26. Consumo de agua dulce disminuido por 1[MUSD] invertido en cada escenario con respecto a 1.000 toneladas de producto líquido.

En este caso, se tiene que la diferencia de los índices obtenidos para cada escenario no es mayor, como sí ocurrió en el caso de la huella de carbono. Si bien existe una variación entre ellos, esta corresponde al 2% entre el escenario más y menos favorable, siendo esta diferencia 2 órdenes de magnitud menor en relación al índice de huella de carbono. Es así, como se descartan los escenarios 3 y 4 debido al desempeño de huella de carbono.

Al analizar la diferencia entre el índice de huella hídrica entre los escenarios 1 y 2, se tiene una diferencia favorable de un 1% con respecto al primer escenario. Es aquí donde se debe decidir entre factores ambientales y económicos, puesto que el escenario 1 permite reducir la huella hídrica un 4% más, pero el costo de su inversión es 1% mayor.

Por eficiencia, tanto en huella de carbono como huella hídrica, se propone que el escenario 2 es el más conveniente. De esta forma, los cambios que se deberían realizar corresponden a: Instalación de paneles fotovoltaicos, cambio de compresores por modelos más actuales y uso de nitrógeno como refrigerante.

Cabe destacar, que las alternativas de cambio tienen distinta complejidad de implementación. Algunas, tienen relación directa con el proceso y requieren de cambiar ciertos equipos, como la mayoría de los cambios tácticos. Por ejemplo, la alternativa de usar nitrógeno líquido como refrigerante requiere de una menor inversión que cambiar el *chiller* que se usa actualmente por uno que funcione con R134a. Sin embargo, la segunda alternativa sólo requiere un cambio de equipo, pero mantiene el principio de funcionamiento de la etapa, por tanto, no existen riesgos en la implementación. En este caso, la primera opción requiere más estudio de la operación e implementación de un nuevo sistema de refrigeración.

De igual forma, se tiene que las alternativas estratégicas tienen distinta complejidad de implementación: Por un lado, se tiene que la opción de incorporar energía solar en el proceso es ambientalmente favorable, pero se escapa de eje central del proceso, teniendo que incorporar

personal que se encargue constantemente del funcionamiento de la planta solar. Además, se incurre en gastos de terreno o habilitación de este; Por el otro lado, se tiene que cambiar la tecnología de funcionamiento de las torres de enfriamiento corresponde a una modificación a gran escala dentro del proceso y no representa un impacto positivo ambientalmente, pero sigue siendo una alternativa de cambio directo del proceso y no requiere de mayor estudio.

De esta forma, toma particular importancia cuál es el objetivo que la empresa considerará al momento de realizar cambios o analizar una posible reducción de impacto ambiental. Un ámbito positivo de haber estudiados escenarios corresponde a que estos que pueden alinear dependiendo que las necesidades o requerimientos de la empresa.

Con respecto a la evaluación, se tiene que este análisis nos da información sobre qué factor ambiental es más costoso. En este caso, facilitar una reducción de emisiones de GEI significa enfrentar una barrera inicial mucho más alta que reducir el consumo de huella hídrica. No obstante, ambos indicadores tienen una relación estrecha al analizar sus orígenes, ya que están influenciados principalmente por el uso de electricidad.

Por otra parte, estos índices económicos solo entregan información sobre el capital que se debe invertir para incorporar estas medidas. Para obtener un análisis más completo, hay que evaluar cuáles son los costos de operación, como mantenimiento, y otros gastos en que se debe incurrir antes y durante el funcionamiento de las alternativas. De esta misma forma, se debe evaluar cuál es el beneficio económico que trae disminuir la electricidad consumida, al igual que el agua.

Es de suma importancia recalcar que el cambio se verá reflejado de manera permanente, esperando que permita recuperar la inversión en un plazo aceptable, puesto que el consumo energético corresponde a la variable de impacto mayor en la empresa, tanto ambiental como económico.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

El trabajo desarrollado busca determinar cuál es el impacto de una planta de separación y licuación de gases como nitrógeno, oxígeno y argón, ubicada en la sexta región de Chile. Para esto, se analizó el ciclo de vida de la producción de 1.000 toneladas de producto líquido, donde un 66 % corresponde a nitrógeno líquido, un 31,5% a oxígeno líquido y un 2,5% a argón líquido. Se consideró dentro del ciclo de vida la producción y la distribución de los productos, para identificar potenciales mejoras que permitieran reducir el impacto ambiental del proceso.

Para cuantificar el impacto se estudió la huella de carbono y la huella hídrica del proceso, obteniendo como resultado 1.315 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y 34.730 m<sup>3</sup> de agua dulce. Del análisis, se puede determinar que la electricidad es la variable más intensiva tanto en huella de carbono como huella hídrica, debido al componente de la generación termoeléctrica de energía que posee la matriz energética de la sexta región. Además, se puede concluir que el transporte no es una variable influyente en el impacto ambiental de ciclo de vida.

Es importante mencionar, que la elaboración del ciclo de vida del proceso y el análisis de las alternativas están sujetos a información bibliográfica. Una medición detallada del proceso permitiría ganar precisión en estos análisis.

Se compararon siete alternativas que permitirán reducir el impacto ambiental, centradas principalmente en eficiencia energética. Analizando indicadores ambientales, se pudo determinar que la instalación de paneles fotovoltaicos y cambio de compresores por tecnología moderna ayudan a reducir el impacto de la planta influyendo un 8% y un 10% en huella de carbono, respectivamente, y ambas un 9% en huella hídrica. Sin embargo, se requiere de una fuerte inversión, con costos de 1,25 MMUSD y 1,07 MMUSD respectivos.

Para dar una recomendación a la empresa, se analizaron cuatro escenarios que incorporaban tres alternativas de cambio. Se comparó la eficiencia de reducción de impacto en función al costo, obteniendo que el escenario más favorable disminuye 0,11 tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente al invertir 1 MUSD, presentando una diferencia de hasta un 34% con otros escenarios. Sin embargo, la disminución de agua dulce presentó una diferencia despreciable comparando otros escenarios.

De esta forma, se sugiere a la empresa reducir el impacto ambiental de la empresa mediante la incorporación de paneles fotovoltaicos, recambio tecnológico de compresores y uso de nitrógeno como refrigerante. Esta estrategia permitiría reducir la huella de carbono en un 19,4% y reducir la huella hídrica en un 18,6%, llevando a cabo una inversión de 2.335 MUSD. Se recomienda realizar una evaluación económica más detallada, incorporando costos de operación y beneficio.

Para finalizar, se tiene que reducir la huella de carbono es potencialmente más atractivo que reducir la huella hídrica, puesto que mundialmente se están buscando formas de detener los efectos del cambio climático. Para provocar este cambio, es efectivo disminuir el consumo energético de las instalaciones, ayudando, de igual forma, a disminuir la huella hídrica del proceso.

## 6 Bibliografía

- [1] SABINO C. Desarrollo y Calidad de Vida. 2004. UNIÓN EDITORIAL..
- [2] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. La ciencia del clima. 2010. [En línea]. <[http://unfccc.int/portal\\_espanol/informacion\\_basica/antecedentes/items/6170.php](http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/antecedentes/items/6170.php)> [Consulta: 08 agosto 2016].
- [3] LIVESCIENCE. Planet Earth, What is the Greenhouse Effect?. Abril 2016. [En línea]. <<http://www.livescience.com/37743-greenhouse-effect.html>>. [Consulta: 08 agosto 2016].
- [4] A. A. a. M. Allaby. A Dictionary of Earth Sciences. 1999. Oxford University Press. p. 244.
- [5] WORLD RESOURCES INSTITUTE. The History Of The Carbon Dioxide Emissions. Mayo 2014. [En línea]. <<http://www.wri.org/blog/2014/05/history-carbon-dioxide-emissions>>. [Consulta: 08 agosto 2016].
- [6] NASA. GLOBAL CLIMATE CHANGE. Enero 2015. [En línea]. <<http://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>>. [Consulta: 09 agosto 2016].
- [7] Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile. Informe del Estado del Medio Ambiente, Capítulo 11, Cambio Climático. 2011a.
- [8] NASA. Precipitation Education, The Water Cycle. [En línea]. <<https://pmm.nasa.gov/education/water-cycle>>. [Consulta: 09 agosto 2016].
- [9] FAO. El Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura (SOLAW): Cómo gestionar los sistemas en peligro. 2011. Earthscan, Roma/Londres.
- [10] MIT. ChemE, What is Chemical Engineering?. [En línea]. <<http://web.mit.edu/cheme/about/what.html>>. [Consulta: 12 agosto 2016].
- [11] FCFM, Universidad de Chile. Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad. [En línea]. <<http://ingenieria.uchile.cl/oficina-de-ingenieria-para-la-sustentabilidad/quienes-somos/106318/oficina-de-sustentabilidad>>. [Consulta: 12 agosto 2016].
- [12] IPCC. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2010. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, New York, USA.
- [13] FAO. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sink. Marzo 2014. [En línea]. <<http://www.fao.org/docrep/019/i3671e/i3671e.pdf>>. [Consulta: 13 agosto 2016].

2016].

- [14] International Monetary Fund. 5. Report for Selected Countries and Subjects. [En línea]. <<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/01/weodata/weorept.aspx?sy=2013&ey=2019&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&c=512%2C668%2C914%2C672%2C612%2C946%2C614%2C137%2C311%2C962%2C213%2C674%2C911%2C676%2C193%2C548%2C122%2C556%2C912%2C678%2C313%2C181%2C>>. [Consulta: 27 marzo 2017].
- [15] G. A. P. INDURA. Soluciones para procesos industriales. [En línea]. <<http://www.indura.net/Web/CL/Soluciones-Para/Procesos-Industriales/Soluciones/Aplicaciones>>. [Consulta: 13 agosto 2016].
- [16] Air Products, Company Conferential. Unidad de Separación de Aire: Diagrama de Flujo de Proceso ASU o PFD. 2006. de *Tecnología Específica: Unidad de Separación de Aire (ASU) Conceptos de Proceso*.
- [17] International Organization for Standardization. ISO 14001: Introduction to ISO 14001:2015. 2015. [En línea]. <[http://www.iso.org/iso/introduction\\_to\\_iso\\_14001.pdf](http://www.iso.org/iso/introduction_to_iso_14001.pdf)> [Consulta: 16 noviembre 2016].
- [18] PENNSTATE. Technologies for Sustainability Systems, 2.4. Life Cycle Assessment (LCA) methodology. 2015. [En línea]. <<https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/690>>. [Consulta: 13 agosto 2016].
- [19] GaBi. Thinkstep GaBi, Newsroom, A brief history of Life Cycle Assessment (LCA). [En línea]. <<http://www.gabi-software.com/news/news-detail/article/a-brief-history-of-life-cycle-assessment-lca/>>. [Consulta: 13 agosto 2016].
- [20] CONSERVACIÓN CARBONO. Análisis del Ciclo de Vida ISO 14040. [En línea]. <<http://www.conservacioncarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040>>. [Consulta: 14 agosto 2016].
- [21] H. L. e. al. A Review of LCA Methods and Tools and their Suitability for SMEs. 2011. *EUROPE INNOVA, BIOCHEM*.
- [22] S. A. I. C. (SAIC). LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE. 2006. EPA, CINCINNATI, OHIO.
- [23] LIFE. Análisis del Ciclo de Vida (ACV). 2005. [En línea]. <[http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOIL\\_Ciclo\\_de\\_Vida.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOIL_Ciclo_de_Vida.pdf)>. [Consulta: 13 agosto 2016].
- [24] MORENO S. 2016. *Evaluation of the integration of solar and mining industries through a life cycle assessment*. Ingeniería Civil Química. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,

Universidad de Chile.

- [25] European Industrial Gasses Association (EIGA). METHODOLOGY TO ESTABLISH A “PRODUCT CARBON FOOTPRINT”, Doc 167/11. 2011.
- [26] International Organization for Standardization. ISO 14044:2006 ENVIRONMENTAL MANAGEMENT —LIFE CYCLE ASSESSMENT —REQUIREMENTS AND GUIDELINES. Septiembre 2009.
- [27] CDEC SIC. GRÁFICOS Y ESTADÍSTICAS, PRODUCCIÓN Y TRANSFERENCIA DE ENERGÍA. Noviembre 2016. [En línea]. <<http://www.cdecsic.cl/informes-y-documentos/graficos-y-estadisticas/produccion-y-transferencia-de-energia/>>. [Consulta: 17 noviembre 2016].
- [28] ECOINVENT. *Ecoinvent 3.3 dataset documentation, air separation, cryogenic - GLO*, Copyright ecoinvent Centre. 2016.
- [29] ECOINVENT CENTE. Welcome to the ecoinvent Version 3.3 (2016) Database. 2016. [En línea] <<https://v33.ecoquery.ecoinvent.org/Home/Index>>. [Consulta: 28 septiembre 2016].
- [30] MINISTERIO DE SALUD, GOBIERNO DE CHILE. Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. Junio 2004.
- [31] WATER FOOTPRINT NETWORK. Water footprint : Overview. [En línea]. <<http://waterfootprint.org/en/water-footprint/>>. [Consulta: 15 diciembre 2016].
- [32] HOEKSTRA, ARJEN Y. et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. 2011.
- [33] CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. HUELLA HÍDRICA: La nueva norma internacional ISO 14046:2014 y su implementación. 2014.
- [34] MINISTERIO DE INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA, GOBIERNO DE CHILE. Política Nacional para los Recursos Hídricos. 2015.
- [35] CHILE. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Legislación Chilena. 2008. Ley 20.257. 01 abril 2008.
- [36] MINISTERIO DE ENERGÍA. Explorador de Energía Solar para Autoconsumo. Geofísica, FCFM, 2016. [En línea]. <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>>. [Consulta: 23 noviembre 2016].
- [37] Swanson R. M. 2009. Photovoltaics Power Up. *Science*, nº 329, pp. 891-2.
- [38] SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, GOBIERNO DE CHILE. Declaración de Impacto Ambiental "Parque Solar Fotovoltaico La Acacia". 16 febrero 2016. [En línea]. <<http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2131185477>>. [Consulta: 28



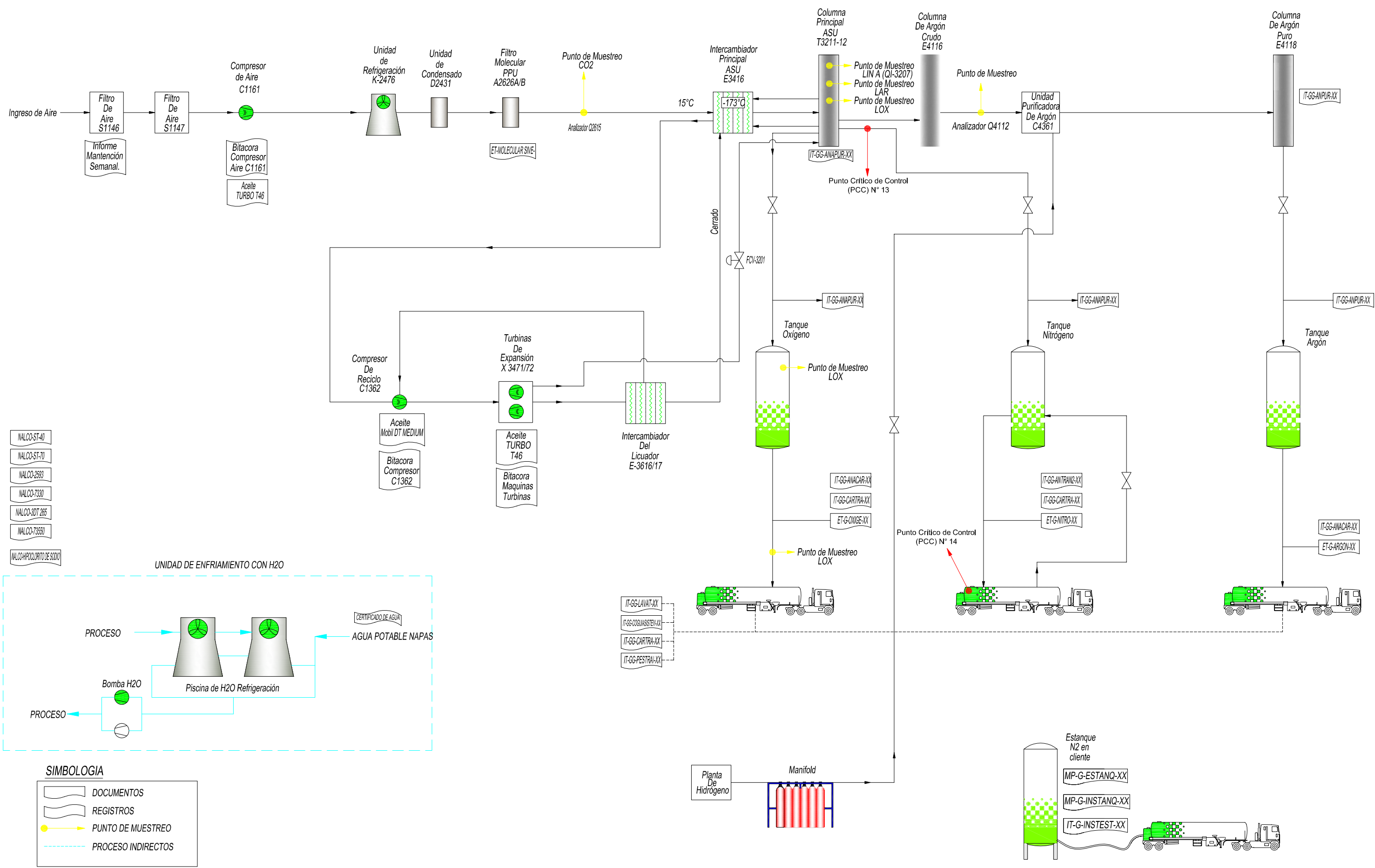
diciembre 2016].

- [39] SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, GOBIERNO DE CHILE. Declaración de Impacto Ambiental "Parque Solar Fotovoltaico La Frontera". 16 febrero 2016. [En línea]. <<http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2131186457>>. [Consulta: 28 diciembre 2016].
- [40] IDAE. "Guía técnica de torres de refrigeración". 2007. IDAE.
- [41] TECNO-EQUIP. REPORTE DE PRODUCTO: ¿Cuánto consume en agua tu torre de enfriamiento?. febrero 2004. [En línea]. < [http://www.tecnoequip.com/boletines/7\\_Tecnoequip\\_com.pdf](http://www.tecnoequip.com/boletines/7_Tecnoequip_com.pdf)>. [Consulta: 26 enero 2017].
- [42] BAC. Torres de Enfriamiento de Circuito Cerrdo. [En línea]. <<http://www.baltimoreaircoil.com/english/resource-library/file/2815>>. [Consulta: 26 enero 2015].
- [43] ZÚÑIGA, GABRIELA. 2016. *Contacto directo*. Santiago, Chile. INDURA S.A.
- [44] ALIBABA. 250m3/min FS-Elliott Oil-free Centrifugal Air Compresso. [En línea]. <[https://www.alibaba.com/product-detail/250m3-min-FS-Elliott-Oil-free\\_604911082.html?spm=a2700.7724838.0.0.z087Ad&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/250m3-min-FS-Elliott-Oil-free_604911082.html?spm=a2700.7724838.0.0.z087Ad&s=p)>. [Consulta: 15 marzo 2017].
- [45] SURPLUS RECORD. AIR COMPRESSORS & ACCESSORIES, 15000 cfm, 125 psig, Cooper / Joy #TA-160, 3000 HP, remanufactured, warranty. [En línea]. <<https://www.surplusrecord.com/cgi-bin/adpop.pl?861587>>. [Consulta: 28 febrero 2017].
- [46] KOOIJMAN, H. y TAYLOR, R. The ChemSep Book. Netherlands. 2006.
- [47] ANEKE, M. y WANG M. Improving the Energy Efficiency of Cryogenic Air Separation Units (ASU) through Compressor Waste Heat Recovery using Direct Binary Heat Engine Cycle. 2015. de *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering.*, Copenhagen.
- CAMPBELL J. M. 2014. Gas conditioning and Processing, Vol 2: The Equipment Modules, novena edición. Norman, USA. R.A. Hubbard K.S. McGregor, John M. Campbell & Company.
- [48]
- [49] CHILE. Biblioteca Nacional de Chile. 2006. LEY NUM. 20.096. Gobierno de Chile. 23 marzo 2006.
- [50] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, GOBIERNO DE CHILE. Informe del Estado del Medio Ambiente, Capítulo 12, Agotamiento de la Capa de Ozono.2011a.

- [51] SPATZ, M. W. , YANA MOTTA, S. F. 2004. An evaluation of options for replacing HCFC-22 in medium temperature refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*. vol. 27, pp. 475-483.
- [52] ALIBABA. Screw type water cooled water chiller, high efficiency, R134a. [En línea]. <[https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/Screw-type-water-cooled-water-chiller\\_60587211823.html?spm=a2700.7724838.0.0.129n8m&s=p](https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/Screw-type-water-cooled-water-chiller_60587211823.html?spm=a2700.7724838.0.0.129n8m&s=p)>. [Consulta: 15 marzo 2017].
- [53] TUBOS DE LED. Tabla de equivalencias. [En línea]. <<http://www.tubosdeled.com/tabla-de-equivalencias/>>. [Consulta: 23 marzo 2017].
- [54] ALIBABA, Compound Flow Closed Circuit Cooling Water Tower Industrial Cooling Tower Pvc Cooling Tower Fill. [En línea]. <[https://www.alibaba.com/product-detail/Compound-Flow-Closed-Circuit-Cooling-Water\\_60605640820.html?spm=a2700.7724838.0.0.KbqzDR](https://www.alibaba.com/product-detail/Compound-Flow-Closed-Circuit-Cooling-Water_60605640820.html?spm=a2700.7724838.0.0.KbqzDR)> [Consulta: 15 marzo 2017].
- [55] ALIBABA. unique design Make to Order nitrogen evaporator Brazed Heat Exchanger. [En línea]. <[https://www.alibaba.com/product-detail/unique-design-Make-to-Order-nitrogen\\_60550660293.html?spm=a2700.7724838.0.0.XbOjLN](https://www.alibaba.com/product-detail/unique-design-Make-to-Order-nitrogen_60550660293.html?spm=a2700.7724838.0.0.XbOjLN)>. [Consulta: 15 marzo 2017].
- [56] CENGEL, Y.A. & BOLES, M.A. 1994. Thermodynamics: an engineering approach. Segunda edición, McGraw Hill, Londres.
- [57] BRANAN, CARL R. 2005. Rules of Thumb for Chemical Engineers. Cuarta edición. Ebook. Elsevier.

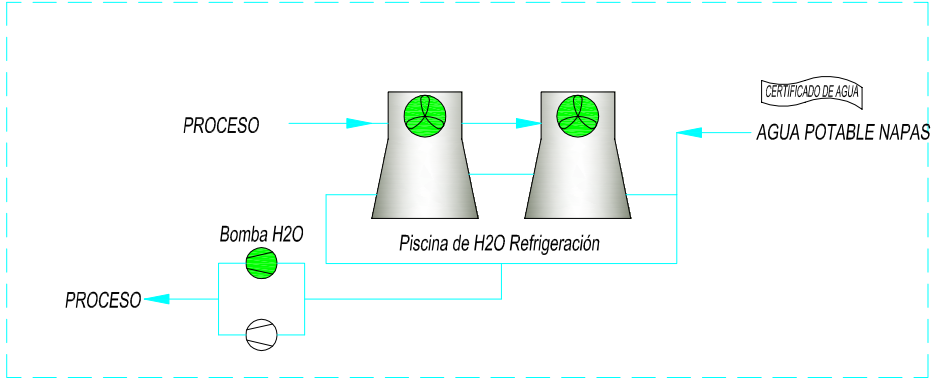
## 7 Anexos

### 7.1 Diagrama de flujos de una ASU



- NALCO-ST-40
- NALCO-ST-70
- NALCO-2593
- NALCO-7330
- NALCO-30T-265
- NALCO-73550
- NALCO-PROCESO DE SODIO

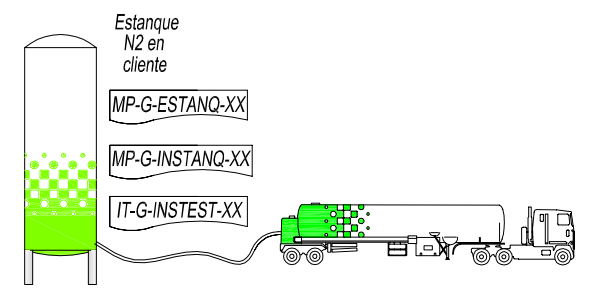
**UNIDAD DE ENFRIAMIENTO CON H2O**



**SIMBOLOGIA**

- DOCUMENTOS
- REGISTROS
- PUNTO DE MUESTREO
- PROCESO INDIRECTOS

- IT-GG-LAVAT-XX
- IT-GG-008UNISTEN-XX
- IT-GG-CARTRA-XX
- IT-GG-PESTRAL-XX



## 7.2 Huella de carbono del caso basal de estudio

A continuación, se presenta el desglose del ciclo de vida considerado para cada una de las variables del proceso. Cabe destacar que los datos de la huella de carbono fueron obtenidos de la base de datos EcolInvent v3.3 2016, licencia educativa. [29]

Se incorporaron las principales fuentes emisoras, de manera de obtener resultados significativos, y se consideraron los GWP que se presentan en la Tabla 3.

### 7.2.1 Electricidad

En la Tabla 12 se presenta la huella de carbono de la electricidad evaluada en la producción de 1 [kWh]. Estos datos incorporan la distribución de esta.

*Tabla 12. Huella de carbono de la producción de 1 [kWh] con diferentes fuentes energéticas.*

Fuente energética	Unidad	CO <sub>2</sub> [kg]	NOx [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	HCFC 22 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Termoeléctrica	1 [kWh]	0,91	2,87E-03	3,220E-05	1,68E-09	1,80
Hidroeléctrica	1 [kWh]	0,12	-	-	-	0,12
Eólica	1 [kWh]	0,01	-	-	-	0,01
Solar	1 [kWh]	0,07	-	-	-	0,07

Luego, se analiza la influencia de cada fuente energética, la que está dada por la proporción de distribución del SIC [27]. En la Tabla 13 se presenta la huella de carbono de la electricidad utilizada en producir 1.000 [t] de producto líquido.

*Tabla 13. Huella de carbono de la electricidad utilizada en la producción de 1.000 [t] de producto líquido.*

Fuente energética	Fracción de suministro	Electricidad suministrada [kWh]	CO <sub>2</sub> eq [t]
Termoeléctrica	57,3%	648.891	1.166,55
Hidroeléctrica	34,9%	395.278	65,62
Eólica	4,1%	46.437	0,31
Solar	3,7%	41.906	2,93
<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>	<b>1.133.000</b>	<b>1.235,41</b>

### 7.2.2 Hidrógeno

Con respecto al hidrógeno se evalúa cuál es el impacto de la producción de este, debido a que la empresa posee una planta de producción de hidrógeno para consumo en el proceso y para venta exterior. Además, este se consume completamente en el proceso, por lo que no existe disposición. En la Tabla 14 se presenta la huella de carbono de la producción de 1 [kg] de hidrógeno.

*Tabla 14. Huella de carbono de la producción de 1 [kg] de hidrógeno.*

Componente	Unidad	CO <sub>2</sub> [kg]	NOx [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	HCFC 22 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Hidrógeno	1 [kg]	1,24	2,10E-3	1,8E-2	-	2,27

Se tiene que para producir 1.000 [t] de producto líquido, se requiere de 103 [kg] de hidrógeno. Así, la huella de carbono del hidrógeno necesario en el proceso es 0,23 [t] de CO<sub>2</sub> equivalente.

### 7.2.3 Refrigerante

Con respecto al refrigerante, se evaluó la huella de carbono de la producción del R22, el transporte desde China, y la disposición. El transporte local no se considera debido a que la magnitud de la variable es pequeña, al igual que la distancia recorrida, puesto que se estima que se trae y se dispone en Santiago. Los resultados se observan en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 respectivamente.

*Tabla 15. Huella de carbono de la producción de 1 [kg] de refrigerante.*

Componente	Unidad	HCFC22 [kg]	HCFC23 [kg]	CFC12 [kg]	CFC 11 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Refrigerante	1 [kg]	3,8E-3	3,5E-3	8,2E-4	1,1E-5	57,20

*Tabla 16. Huella de carbono del transporte marítimo de 1 [t\*km] de refrigerante.*

Componente	Unidad	CO <sub>2</sub> [kg]	NOx [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	HCF 22 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Refrigerante	1 [t*km]	7,79E-3	1,36E-4	-	-	0,05

Con respecto al transporte marítimo, se estima que la distancia recorrida desde China equivale a 2.000 [km].

*Tabla 17. Huella de carbono de disponer 1 [kg] de refrigerante.*

Componente	Unidad	CO <sub>2</sub> [kg]	NOx [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	HCFC 22 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Refrigerante	1 [kg]	1,51	-	-	0,01	18,52

De esta forma, la huella de carbono de 1[kg] de refrigerante corresponde a 0,08 [t] de CO<sub>2</sub> equivalente.

### 7.2.4 Transporte

Para analizar esta variable, se consideró el transporte de productos refrigerados en un lorry de 16 toneladas métricas. La empresa cuenta con camiones de 18 toneladas métricas y para obtener datos representativos, se aplicó un factor lineal. En la Tabla 18, se presentan los datos correspondientes a la huella de carbono de 1 [t\*km] transportada.

*Tabla 18. Huella de carbono del transporte refrigerado de 1 [t\*km] de producto líquido.*

Componente	Unidad	CO <sub>2</sub> [kg]	NOx [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	HCF 22 [kg]	CO <sub>2</sub> eq [kg]
Transporte refrigerado	1 [t*km]	0,18	7,66E-4	1,13E-7	-	0,18

Considerando las relaciones mostradas en la Tabla 2, se presenta la huella de carbono de la distribución en la Tabla 19.

Tabla 19. Huella de carbono del transporte refrigerado por tonelada de producto líquido.

Producto	Unidad funcional [t]	Distancia recorrida [km]	CO <sub>2</sub> equivalente [kg]
Nitrógeno líquido	660	12.831	2.296,75
Oxígeno líquido	315	11.324	1.027,00
Argón líquido	25	1.982	354,78
<b>TOTAL</b>	<b>1.000</b>	<b>26.137</b>	<b>4.678,52</b>

### 7.3 Huella hídrica del caso basal de estudio

Para el desarrollo de la huella hídrica se tomaron las mismas consideraciones que para el desarrollo de la huella de carbono. La huella hídrica corresponde al uso de agua dulce en el ciclo de vida del proceso y sus variables. A continuación, se presenta la huella hídrica de cada una de las variables que influyen en el proceso.

#### 7.3.1 Electricidad

En la Tabla 20 se presenta la huella hídrica de la electricidad evaluada en la producción de 1 [kWh]. Estos datos incorporan la distribución de esta. Luego, en la Tabla 21 se presenta la huella hídrica de la electricidad usada para producir 1.000 [t] de producto líquido.

Tabla 20. Huella hídrica de la producción de 1 [kWh] con diferentes fuentes energéticas.

Fuente energética	Unidad	Agua [m <sup>3</sup> ]
Termoeléctrica	1 [kWh]	4,87E-2
Hidroeléctrica	1 [kWh]	8,02E-5
Eólica	1 [kWh]	9,73E-3
Solar	1 [kWh]	5,76E-4

Tabla 21. Huella hídrica de la electricidad utilizada en la producción de 1.000 [t] de producto líquido.

Fuente energética	Consumo [kWh]	Agua [m <sup>3</sup> ]
Termoeléctrica	648.891	31.632,38
Hidroeléctrica	395.278	317,21
Eólica	46.437	451,64
Solar	41.906	24,14

#### 7.3.2 Hidrógeno

En la Tabla 22 se presenta la huella de carbono de la producción de 1 [kg] de hidrógeno. De esta forma, la huella hídrica de la producción del hidrógeno necesario para el proceso corresponde a 7,73 [m<sup>3</sup>].

Tabla 22. Huella hídrica de la producción de 1 [kg] de hidrógeno.

Componente	Unidad	Agua [m <sup>3</sup> ]
Hidrógeno	1 [kg]	7,53E-2

### 7.3.3 Refrigerante

En este caso, se analiza la huella hídrica únicamente de la producción del refrigerante, ya que ni la disposición ni el traslado utiliza agua. En la Tabla 23 se presenta la huella hídrica de 1 [kg] de refrigerante, correspondiente a lo utilizado en la producción de 1.000 [t] de producto líquido.

Tabla 23. Huella hídrica de la producción de 1 [kg] de refrigerante.

Componente	Unidad	Agua [m <sup>3</sup> ]
Refrigerante	1 [kg]	9,53E-4

### 7.4 Estudio de utilización de *chiller* economizador [48]

A continuación, se presenta el estudio de un *chiller* economizador usado en un sistema que requería enfriar gas de proceso. A continuación, se presenta un diagrama del proceso en la Figura 27 y se mencionan las condiciones de operación del sistema.

- Se extrae del gas una potencia en forma de calor correspondiente a 2.778 [kW].
- El gas de proceso entra al sistema de enfriamiento a -35 [°C].
- Se emplea el propano puro como fluido térmico.
- El condensador trabaja a una temperatura de 35 [°C].
- Se asume una caída de presión de 5 [kPa] en el evaporador y 5 [kPa] en la línea de succión. La caída de presión en el condensador más la de la línea de descarga, entre el compresor y el condensador, se consideró 50 [kPa], de manera que la presión de descarga de la unidad es de 1.270 [kPa].
- La presión efectiva de succión del compresor es de 132,4 [kPa].
- La temperatura de descarga del compresor es de 50 [°C].
- La carga térmica del condensador es de 4.434 [kW].

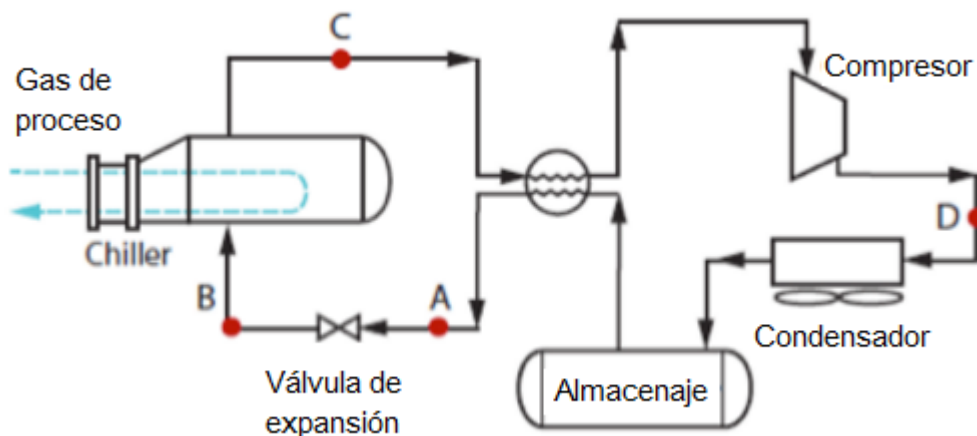


Figura 27. Diagrama de proceso para un sistema de refrigeración con intercambiador economizador. [48]



Mediante simulación en programa de solución computacional UNISIM, se obtuvieron resultados con respecto al cambio de potencia utilizada por el compresor y al flujo másico de refrigerante utilizado, evaluando distintos escenarios de caída de presión en el intercambiador que permite economizar. Los resultados se presentan en la Figura 28 y Figura 29.

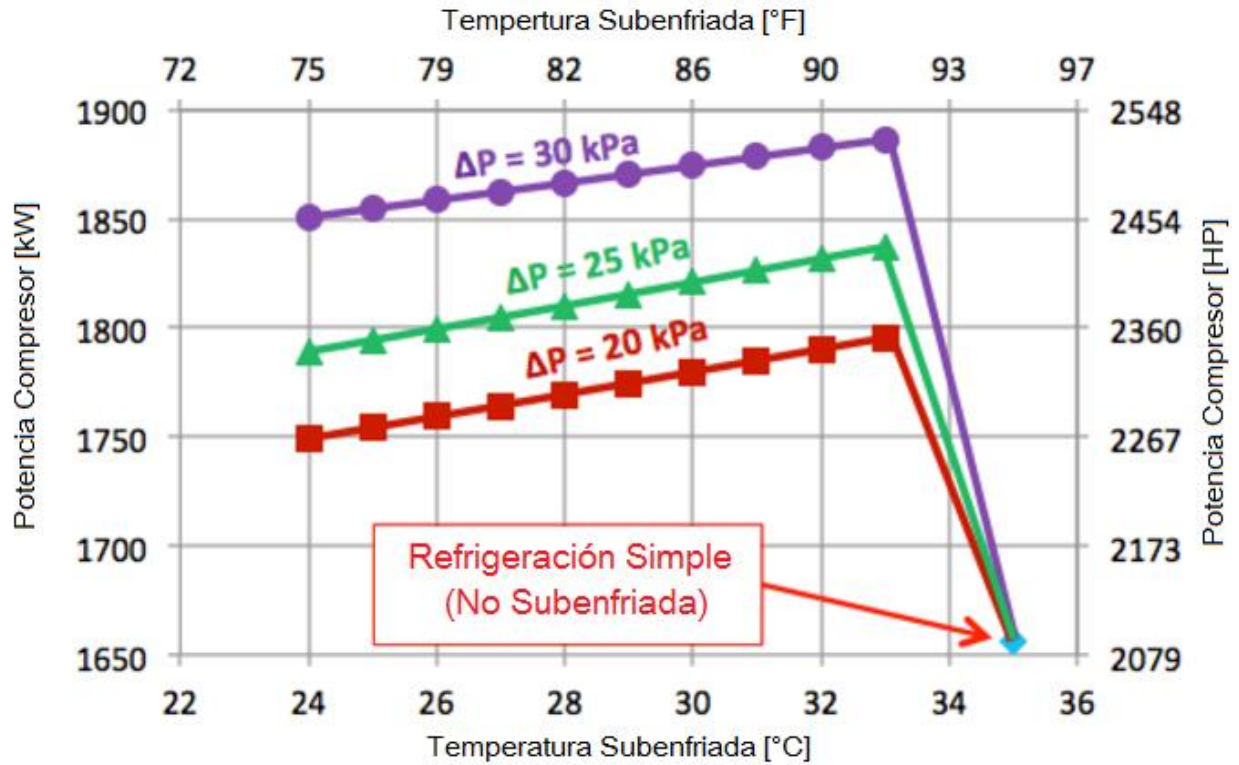


Figura 28. Potencia de compresión como función de la temperatura sub-enfriada del refrigerante en el intercambiador economizador. [48]

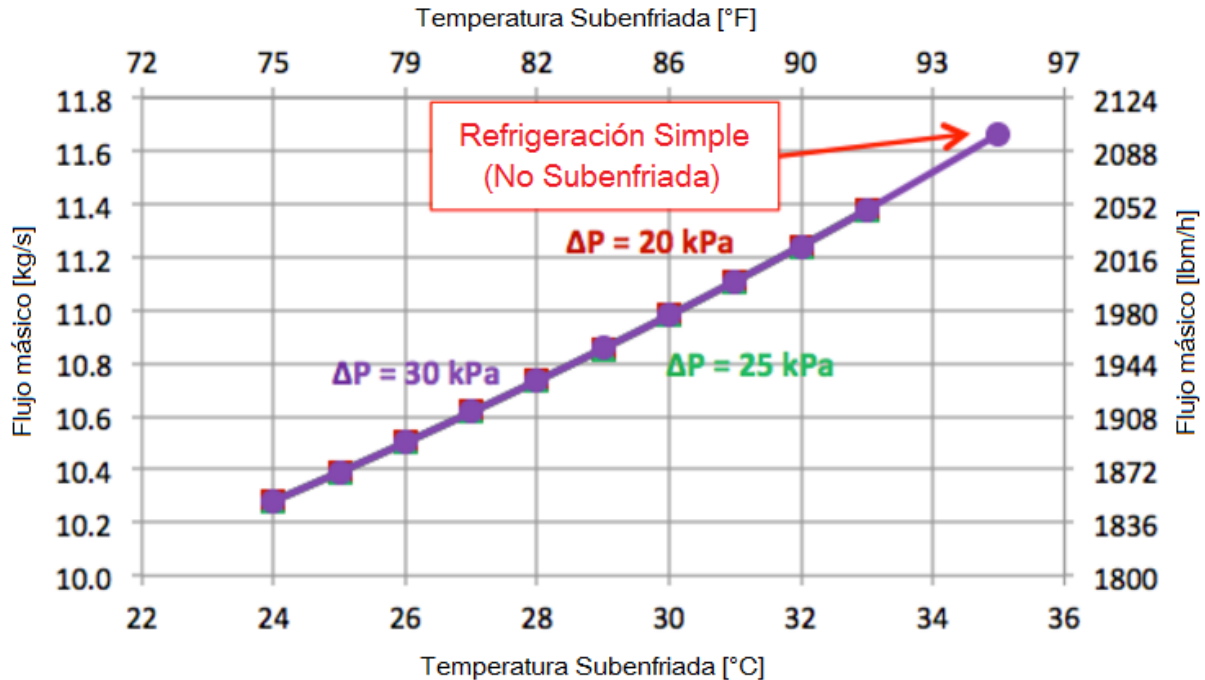


Figura 29. Flujo másico de refrigerante en circulación en función de la temperatura sub-enfriada del refrigerante en el intercambiador economizador. [48]

## 7.5 Transferencia de calor con nitrógeno líquido

Se propone utilizar nitrógeno líquido como medio de enfriamiento de aire. Se analizaron dos alternativas: la opción 1 es usar agua como medio de enfriamiento de aire, enfriada agua con nitrógeno líquido; y la opción 2 enfriar el aire directamente con nitrógeno líquido.

Se determinaron supuestos generales para ambas opciones, las que se describen a continuación. Cabe mencionar, que los supuestos que se consideran fueron obtenidos desde la comparación de datos reales de otras plantas o de fuentes bibliográficas.

- Para realizar los cálculos, se supone que los intercambiadores tienen configuración de tubo concéntrico.
- Se supone despreciable otro tipo de transferencia de calor, ya sea por convección hacia el ambiente o por radiación, puesto que los equipos en la planta se encuentran en un lugar cerrado, sin variación significativa de temperatura.
- El nitrógeno transfiere la totalidad del calor latente disponible en el cambio de fase. Además, se considera una transferencia de 100 [°C] con nitrógeno gaseoso, suponiendo que este sale del equipo a -95 [°C], ya que se considera un caso similar al intercambiador de la planta de helio de la misma empresa. En este caso, se tiene una temperatura mínima de salida del nitrógeno de -60 [°C], y una temperatura máxima de -130 [°C], es por esto que se considera un promedio entre el rango dado. Esto se decide luego de analizar datos de salida del nitrógeno, donde la moda está en el rango de -100 [°C] y -80

[°C]. Los datos entregados han sido rescatados de forma directa de la planta de helio de la empresa.

- La transferencia de calor real no corresponde a la teórica, puesto que los supuestos pueden idealizar la transferencia. Por esta razón, se considera una eficiencia de 80% en cada intercambiador, propuesto generalmente en equipos industriales [47].

De acuerdo a los supuestos nombrados anteriormente, se procede a obtener el flujo de nitrógeno líquido que se requiere y el área del intercambiador de calor. Para el cálculo de estas variables, se utilizan la ecuación 2, ecuación 3 y ecuación 4 [56].

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad \text{Ec. 2}$$

$$\dot{Q} = f * U * A * \Delta T_{log} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{h1}-T_{c2})-(T_{h2}-T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h1}-T_{c2}}{T_{h2}-T_{c1}}\right)} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Flujo de calor transferido [W].

$\dot{m}$ : Flujo másico de fluido [kg/s].

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura de salida y entrada del fluido [K].

$f$ : Factor de seguridad.

$U$ : Coeficiente de transferencia global en intercambiador [W/m<sup>2</sup>\*K].

$A$ : Área de intercambio [m<sup>2</sup>].

$\Delta T_{log}$ : Diferencia de temperatura logarítmica entre los fluidos [K].

$T_{h1}$ : Temperatura de entrada del fluido caliente [K].

$T_{h2}$ : Temperatura de salida del fluido caliente [K].

$T_{c1}$ : Temperatura de entrada del fluido frío [K].

$T_{c2}$ : Temperatura de salida del fluido frío [K].

En la Tabla 24 se presentan los datos correspondientes a la transferencia de calor del aire hacia el medio refrigerante. Los valores se obtienen desde la planta en estudio y el calor transferido se obtiene utilizando la ecuación 2.

Tabla 24. Datos correspondientes a la transferencia de calor del aire.

Variable	Valor	Unidad
Flujo másico	4.256	[kg/h]
Cp aire	1	[kJ/kg*K]
Temperatura entrada aire	298	K
Temperatura salida aire	5,8	K
Calor transferido	81.538	[kJ/h]
Factor de seguridad	0,8	-

Además, se tiene que el nitrógeno transfiere calor por cambio de fase y en estado gaseoso, siguiendo la ecuación 5. [56]

$$\dot{Q}_{N_2} = f \cdot \dot{m} \cdot (\lambda + C_p \cdot \Delta T) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde  $\lambda$  corresponde al calor latente de evaporación del nitrógeno. En la Tabla 25 se presentan los datos que se necesitan para obtener las variables requeridas.

Tabla 25. Datos correspondientes a la transferencia de calor de nitrógeno.

Variable	Valor	Unidad
Calor latente [56]	5.560	[kJ/kmol]
Cp nitrógeno [56]	1	[kJ/kg*K]
Temperatura entrada nitrógeno [56]	298	K
Temperatura salida nitrógeno	5,8	K
Peso molecular nitrógeno [56]	28	[kg/kmol]
Factor de seguridad	0,8	-

Para poder obtener los resultados esperado, se considera que el calor transferido se conserva, siguiendo la ecuación 6[56].

$$\dot{Q}_{N_2} = \dot{Q} \quad \text{Ec. 6}$$

### Opción 1

Con respecto a la opción 1, se consideró que supone que el agua debe entrar al intercambiador con aire a 5 [°C] y debe salir a 19 [°C]. Esta información fue obtenida analizando datos de estudios de plantas similares [46].

Considerando que el Cp del agua es 4,18 [kJ/kg\*K], se tiene que el flujo másico necesario de agua para enfriar el aire corresponde a 1.742 [kg/h].

Igualando la ecuación 2 en función al agua y la ecuación 5, se obtiene el flujo de nitrógeno líquido que se requiere, equivalente a 340 [kg/h].

Para conocer el área del intercambiador de calor, se utilizó la ecuación 6. Se consideró un coeficiente de transferencia global de 85,17 [W/m<sup>2</sup>\*K], y fue obtenido de fuentes bibliográficas suponiendo que los fluidos eran agua y refrigerante [57]. La diferencia de temperatura logarítmica fue calculada obteniendo 150 [K].

Finalmente, se obtuvo como resultado un área de intercambio de 2,77 [m<sup>2</sup>].

#### Opción 2

Para conseguir las variables requeridas, se utiliza la ecuación 6, igualando el calor transferido del aire y del nitrógeno. De esta forma, se obtiene un flujo de nitrógeno líquido de 273 [kg/h].

Para conocer el área del intercambiador de calor, se utilizó la ecuación 6. Se consideró un coeficiente de transferencia global de 56,78 [W/m<sup>2</sup>\*K], y fue obtenido de fuentes bibliográficas suponiendo que los fluidos eran aire y refrigerante [57]. La diferencia de temperatura logarítmica fue calculada obteniendo 157 [K].

Finalmente, se obtuvo como resultado un área de intercambio de 3,17 [m<sup>2</sup>].