



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA  
DESTILADA DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE  
QUÍMICA, UNAM”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**Diego Castañeda Corona**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA  
**VOCAL:** MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA  
**SECRETARIO:** JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
**1er. SUPLENTE:** GEMA LUZ ANDRACA AYALA  
**2do. SUPLENTE:** SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM**

**ASESOR DEL TEMA**

**M. EN I. MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA**

**SUSTENTANTE**

**DIEGO CASTAÑEDA CORONA**

## ÍNDICE

JUSTIFICACIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GENERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
ALCANCE .....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. AGUA PURIFICADA .....	4
1.1.1. Definición y tipos.....	4
1.1.2. Características de calidad .....	5
1.1.3. Proceso de purificación .....	6
1.2. DESTILACIÓN COMO OPERACIÓN UNITARIA .....	7
1.2.1. Destilación de efecto múltiple (MED).....	8
1.2.2. Destilación flash multietapa (MSF) .....	8
2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	10
2.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	10
2.2. Antecedentes del ACV .....	10
2.3. Metodología del ACV .....	11
2.3.1. Definición de alcance y objetivos.....	12
2.3.2. Análisis de inventario.....	14
2.3.3. Evaluación de impacto.....	14
2.3.4. Interpretación de resultados. ....	14
2.4. Programas especializados .....	15
2.4.1. SimaPro.....	15
2.4.2. GaBi.....	15
2.4.3. OpenLCA.....	15
2.5. Bases de datos .....	15
3. SITIO DE ESTUDIO .....	17
3.1. FACULTAD DE QUÍMICA .....	17
3.2. LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA .....	18
4. METODOLOGÍA.....	19
4.1. ELECCIÓN DEL PROCESO DE ESTUDIO .....	19

4.2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.3.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTUDIO Y TOMA DE DATOS.....	19
4.4.	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	21
4.4.1.	Definición de objetivo y alcance.....	21
4.4.2.	Análisis de inventario.....	21
4.4.3.	Evaluación de impacto.....	22
4.4.4.	ACV mediante balance de materia y energía .....	23
4.4.5.	ACV mediante programas .....	23
5.	RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.....	25
5.1.	ANÁLISIS DE INVENTARIO .....	25
5.2.	EVALUACIÓN DE IMPACTO.....	31
5.2.1.	Evaluación de impacto en hoja de cálculo.....	31
5.2.2.	Evaluación de impacto en programas especializados .....	34
5.3.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	42
	CONCLUSIONES.....	44
	REFERENCIAS.....	45

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de proceso MED, elaboración propia a partir de McCabe, 2007. .....	8
Figura 2.	Esquema de proceso MSF, elaboración propia a partir de McCabe, 2007. .....	9
Figura 3.	Esquema de la estructura del ACV, recuperado y traducido de Guinée, 2011. ....	12
Figura 4.	Metodología ACV usada para evaluar los potenciales impactos ambientales de la desalinización. Recuperado y traducido de Zhou, 2014. ....	13
Figura 5.	Edificio “A” de la Facultad de Química, recuperado de Patronato de la Facultad de Química, s.f.....	17
Figura 6.	Interior del Laboratorio de Ingeniería Química, recuperado de Facultad de Química, 2019. ....	18
Figura 7.	Diagrama del proceso de producción de agua destilada.....	22
Figura 8.	Diagrama adaptado del proceso de producción de agua destilada.....	23
Figura 9.	DFP de la producción de agua destilada realizada en el LIQ.....	26
Figura 10.	Proceso para la producción de agua destilada en GaBi Education.....	36

Figura 11. Proceso para la producción de agua destilada en OpenLCA.....	37
Figura 12. Proceso para la producción de agua destilada en SimaPro 7.....	38
Figura 13. Resultados obtenidos en SimaPro 7.....	41
Figura 14. Resultados obtenidos en OpenLCA.....	42

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del agua purificada nivel 1 de acuerdo con la FEUM, 2021.....	6
Tabla 2. Artículos sobre el ACV de diferentes procesos de destilación de agua. .	19
Tabla 3. Tabla de resultados del balance de materia y energía del proceso .....	28
Tabla 4. Determinación de consumo de gas de la caldera (CA-01).....	29
Tabla 5. Flujos máxicos asociados a la combustión de propano.....	30
Tabla 6. Determinación del rendimiento de la bomba (BA-01).....	30
Tabla 7. Determinación de consumo de zeolita.....	31
Tabla 8. Factores de conversión para procesos de destilación recuperado de SEMARNAT, (s.f). .....	32
Tabla 9. Emisiones de gases contaminantes asociados a la producción de agua destilada.....	32
Tabla 10. Factores de potencial de cambio climático a 100 años, recuperado de Heijungs, 1992. ....	33
Tabla 11. Factores de toxicidad humana, recuperado de Heijungs, 1992.....	33
Tabla 12. Factores de potencial acidificación, recuperado de Heijungs, 1992.....	33
Tabla 13. Factores de potencial de eutrofización, recuperado de Heijungs, 1992.	34
Tabla 14. Resultados obtenidos del ACV para la producción de agua destilada. .	39

## LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Balance de materia del condensador (E-01) .....	27
Ecuación 2. Balance de energía del condensador (E-01) .....	28
Ecuación 3. Balance de materia del evaporador de calandria .....	28
Ecuación 4. Balance de energía de la caldera .....	29
Ecuación 5. Cálculo de consumo de gas LP. ....	29

Ecuación 6. Reacción de combustión completa de propano.....	29
Ecuación 7. Cálculo general para obtener la masa de gases contaminantes .....	32
Ecuación 8. Determinación de potencial de calentamiento global.....	33
Ecuación 9. Determinación de potencial de toxicidad humana. ....	33
Ecuación 10. Determinación de potencial de acidificación.....	33
Ecuación 11. Determinación de potencial de eutrofización. ....	34

## **LISTADO DE GRÁFICAS**

Grafica 1. Comparación de los resultados obtenidos para potencial de calentamiento global a 100 años.....	39
Grafica 2. Comparación de los resultados obtenidos para potencial toxicidad humana. ....	40
Grafica 3. Comparación de los resultados obtenidos para potencial acidificación.	40
Grafica 4. Comparación de los resultados obtenidos para potencial eutrofización. ....	41

## JUSTIFICACIÓN

El agua destilada como materia prima, se usa principalmente en el sector manufacturero, en laboratorios y en general, todos los sectores industriales hacen uso del agua destilada para sus procesos productivos, están desde los que elaboran productos alimenticios, hasta los que elaboran aparatos electrónicos, por tal motivo, la industria valora el uso de esta materia prima ya que, se han eliminado las impurezas y el costo-beneficio que representa, tomando en cuenta todas las ventajas que brindan sus propiedades, es bastante elevado.

El agua destilada se refiere al agua que ha sido purificada mediante destilación, removiendo de esta forma sales minerales, microorganismos y sustancias disueltas en ella. La remoción de estas impurezas permite su uso en procesos en los que se requiere minimizar la contaminación de los productos finales. Esto vuelve al agua destilada uno de los insumos más comunes, incluso, es considerado como disolvente universal, por lo tanto, es de vital importancia cuidar su pureza.

Los laboratorios de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México no están exentos de esta necesidad, ya que si se mantiene un control sistemático de la pureza o calidad del agua para uso en el laboratorio se promueve la eliminación de sesgo en los resultados, se evitan interferencias o reacciones colaterales y se aumenta así la confiabilidad en dichos resultados.

Por tal motivo en las instalaciones de su Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ), se encuentra una planta para la producción de agua destilada. Esta abastece a la mayoría de los laboratorios de enseñanza e investigación encontrados en las instalaciones centrales.

El agua destilada no es otra cosa que el agua cruda que se utiliza diariamente para diferentes fines, con la diferencia que ha sido sometida a un proceso de destilación donde el agua se calienta hasta evaporarla para después condensarla obteniendo de esta forma un producto de elevada pureza, libre de materiales indeseables.

Destilar agua requiere de equipos sofisticados o de alta tecnología para lograr obtener la pureza deseada; este proceso para usos y aplicaciones industriales o comerciales requiere de grandes cantidades de energía, la cual se obtiene mediante la quema de combustibles fósiles como el gas licuado de petróleo. Además, para poder condensar el vapor destilado se requieren grandes cantidades de agua. Esta demanda de combustible y agua de enfriamiento conlleva un impacto ambiental asociado al proceso.

Por lo antes mencionado, y con la finalidad de ser congruente con la filosofía de la Facultad de Química de realizar actividades amigables con el medio ambiente, se ve necesario estudiar los impactos ambientales asociados al proceso de producción de agua destilada realizado en el LIQ.

Entre las metodologías más aceptadas por la comunidad científica para evaluar el impacto ambiental, se encuentra el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de un proceso.

El presente trabajo se realizó con el fin de determinar el impacto ambiental asociado al proceso de destilación llevado a cabo en las instalaciones de la Facultad de Química.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso de producción de agua destilada que se produce en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Química de la UNAM, empleando tres programas especializados para conocer el impacto de este servicio a la salud ecosistemas y cambio climático.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Elaborar el Diagrama de Flujo de Procesos (DFP) del sistema de producción del agua destilada.
2. Realizar el balance de materia y energía del proceso de destilación de agua destilada realizado en el LIQ.
3. Determinar los impactos ambientales del proceso mediante el uso de programas especializados para ACV.
4. Comparar los resultados del análisis del ciclo de vida obtenidos mediante el uso de los programas GaBi Education, OpenLCA y SimaPro.
5. Identificar posibles mejoras al proceso de destilación.

## **ALCANCE**

El presente trabajo se restringe al proceso llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM, desde la entrada de agua al laboratorio hasta el almacenamiento de agua destilada. De igual forma este trabajo se realizó con los parámetros disponibles al momento en que se realizó la visita del proceso.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. AGUA PURIFICADA

El agua es una sustancia indispensable para la vida en la Tierra y en estado puro es un líquido incoloro, insípido, e inoloro. De igual forma, es una sustancia indispensable para los procesos realizados en los laboratorios y en las industrias, pero no todos los tipos de agua se pueden emplear para todos los procesos y actividades. Por este motivo diferentes instituciones a nivel internacional como la American Society for Testing and Materials (ASTM) o la International Organization for Standardization (ISO) establecen los parámetros de referencia para la calidad del agua (Valdivia-Medina, 2010).

#### 1.1.1. Definición y tipos

En México la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM) da los parámetros de referencia para la calidad del agua de uso farmacéutico, y de igual forma clasifica los tipos de agua en:

Agua potable: Cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la versión vigente de la NOM-127-SSA1-2021, para el uso y consumo humano.

Agua purificada nivel 1: Se usa como ingrediente en la fabricación de productos farmacéuticos no inyectables y de otros insumos para la salud, en la limpieza de algunos equipos y en las fases finales de síntesis de algunos principios activos y algunos dispositivos médicos. Se prepara a partir de agua potable, sometiéndola a procesos combinados de deionización, ablandamiento, decloración, y/o filtración. La destilación o la ósmosis inversa en la etapa final también son adecuados para su producción.

Agua purificada nivel 2: Se usa como ingrediente en la fabricación de productos farmacéuticos no inyectables que requieren de una alta pureza química y microbiológica. Se prepara a partir de agua potable con los pretratamientos necesarios que pueden incluir deionización, ósmosis inversa (simple o múltiple) y/o ultrafiltración. La destilación en la etapa final de producción también es adecuada.

Agua para la fabricación de inyectables: Se prepara a partir de agua potable a la que se le dan los tratamientos adecuados seguidos de un proceso terminal ya sea destilación o cualquier otra tecnología equivalente o superior que demuestre la eliminación de sustancias químicas, microorganismos y endotoxinas y que no cuente con sustancias adicionales.

Agua estéril para uso inyectable: Es agua para fabricación de inyectables envasada en recipientes adecuados de plástico o de vidrio de hasta un litro y esterilizada térmicamente.

Agua bacteriostática estéril para uso inyectable: Es agua para la fabricación de inyectables esterilizada, que contiene uno o varios agentes antimicrobianos.

Agua estéril para irrigación: Es agua para fabricación de inyectables esterilizada y suministrada en envases de más de un litro y con diseño especial para vaciado rápido durante su uso.

Agua estéril para inhalación: Es agua para fabricación de inyectables esterilizada y envasada en recipientes adecuados. (Secretaría de Salud, 2021, pp 661-662)

Al referirse a agua para métodos analíticos, la FEUM indica que se hace referencia a las especificaciones del agua purificada de Nivel 1, a menos que se indique una especificación diferente.

#### 1.1.2. Características de calidad

El agua tiene diferentes sustancias presentes en ella, ya sean disueltas y/o suspendidas. Por este motivo las instituciones encargadas de indicar las especificaciones de calidad del agua determinan los valores de referencia de cada uno de los parámetros que influyen en la calidad del agua. La FEUM menciona los siguientes parámetros que deben de ser analizados en el agua:

pH: Se basa en la determinación de la actividad de iones hidrógeno, empleando un instrumento potenciométrico. (Secretaría de Economía, NMX-AA-008-SCFI-2016, 2016)

Conductividad: La conductividad electrolítica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura. (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, NMX-AA-093-SCFI-2000)

Metales pesados: Esta prueba se utiliza para determinar el contenido de impurezas metálicas a partir de un análisis colorimétrico, donde se emplea un control preparado a partir de una solución estándar de plomo. (Secretaría de Salud, 2021)

Carbón orgánico total (COT): Actualmente, ninguna norma mexicana abarca los análisis referentes al COT, por lo que se realiza una equivalencia con la demanda química de oxígeno (DQO) cuyo método de prueba se encuentra en la NMX-AA-030/2-SCFI-2011. (Dubber, 2010) Se entiende por DQO al parámetro que mide la concentración de oxígeno equivalente a la cantidad de un oxidante

especificado, que se consume por la materia disuelta o suspendida cuando se trata una muestra de agua con el oxidante bajo condiciones definidas (Secretaría de Economía, NMX-AA-089/2-SCFI-2010, 2010)

Nitratos: El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, ya que se considera el factor determinante en el crecimiento de los organismos autótrofos fotosintéticos. (Secretaría de Economía, NMX-AA-079-SCFI-2001)

Otro parámetro importante para la calidad del agua, y cuyas metodologías de análisis se encuentran descritas en la regulación mexicana es:

Dureza: La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor (Secretaría de Economía, NMX-AA-072-SCFI-2001).

En la Tabla 1 se listan las especificaciones de un agua nivel 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del agua purificada nivel 1 de acuerdo con la FEUM, 2021.

Parámetros fisicoquímicos	Especificación agua purificada de nivel 1
pH	5.0 a 7.0
Conductividad a 25 °C [ $\mu$ S/cm]	5.1
Carbono Orgánico Total (COT) [ppm]	0.5
Metales pesados [ppm]	0.1
Nitratos [ppm]	0.2

### 1.1.3. Proceso de purificación

Las tecnologías que menciona la FEUM, para la obtención de los diferentes tipos de agua purificada son los siguientes (Secretaría de Salud, 2021)

Destilación: En este proceso se evapora el agua potable, el vapor destilado se condensa para obtener agua purificada. El cambio de fase permite separar contaminantes químicos y microbiológicos. El agua purificada obtenida mediante un proceso de destilación se denomina agua destilada.

Osmosis inversa: La purificación se lleva a cabo al emplear una presión diferencial substancial a un flujo de agua, de tal forma que este pase a través de una membrana semipermeable. Dependiendo de la calidad del agua abastecida a las unidades de ósmosis inversa puede ser necesario un pretratamiento, para obtener un producto con la calidad deseada. (Secretaría de Salud, 2021)

**Deionización:** Las unidades de deionización contienen resinas cargadas que eliminan los cationes y aniones presentes en el agua. Los sistemas de deionización deben ser regenerados con bases y ácidos dependiendo de las características de la resina.

**Adsorción con carbón activado:** Los filtros o lechos de carbón activado según el tipo de cartucho o cilindro, adsorben material orgánico de bajo peso molecular y aditivos oxidantes. La remoción de estos materiales sirve para proteger de reacciones a las unidades posteriores en el proceso, como las superficies de acero inoxidable, resinas o membranas. (Secretaría de Salud, 2021)

**Ablandamiento:** Las unidades de ablandamiento de agua emplean resinas iónicas para eliminar los iones de calcio y magnesio.

**Filtración:** Proceso mediante el cual se hace pasar agua a través de una capa de material poroso para remover partículas.

**Decloración:** Eliminación parcial o total del cloro residual del agua con ayuda de un proceso físico o químico. (Secretaría de Economía, NMX-AA-089/1-SCFI-2010, 2010)

## 1.2. DESTILACIÓN COMO OPERACIÓN UNITARIA

No importa en qué sentido o ramo se esté hablando, todo proceso es un conjunto de tareas o pasos, que se realizan en un orden adecuado para obtener el resultado deseado. En el caso de la ingeniería química los procesos químicos pueden dividirse en pasos individuales a los que se conoce como operaciones unitarias. En procesos químicos diferentes se pueden encontrar operaciones unitarias que tienen técnicas comunes entre sí, y se basan en los mismos principios científicos. De forma general en todos los procesos se requiere el transporte de materiales sólidos y líquidos y del intercambio de energía. Y de forma más específica pueden ser necesarias, operaciones como el secado, reducción de tamaño, destilación o evaporación. De este modo se puede entender a las operaciones unitarias como el conjunto de las etapas físicas fundamentales para la preparación de reactantes, separación y purificación de productos, recirculación de los reactantes no convertidos, y para controlar la transferencia de energía. (McCabe, 2007)

La destilación puede que sea uno de los procesos de desalación de agua más antiguos. Este proceso involucra la evaporación de agua seguido de la condensación del vapor destilado. Este cambio de fase requiere de energía térmica producida en generadores de vapor o calderas, y permite la separación de impurezas presentes en el agua, tales como, sales, sólidos suspendidos y materia orgánica. Los procesos más importantes a nivel industrial para la desalación de agua son la destilación de efecto múltiple y la destilación de multi-etapa flash. (Raluy, 2004)

### 1.2.1. Destilación de efecto múltiple (MED)

La destilación de efecto múltiple se basa en el proceso simple de evaporación de agua y consta de dos equipos, un condensador y un evaporador. El agua es alimentada al evaporador donde se dispersa sobre el haz de tubos de este provocando su evaporación, quedando las sales concentradas en el fondo del depósito, también llamado efecto. Esta evaporación se realiza gracias al calor de condensación de una corriente de vapor externo. En su recorrido ascendente el vapor destilado pasa a través del condensador donde se condensa en agua destilada.

En la destilación de efecto múltiple (Figura 1), el proceso descrito previamente continúa por varias etapas, normalmente un proceso a nivel planta tiene entre 8 a 16 etapas. (Raluy, 2004).

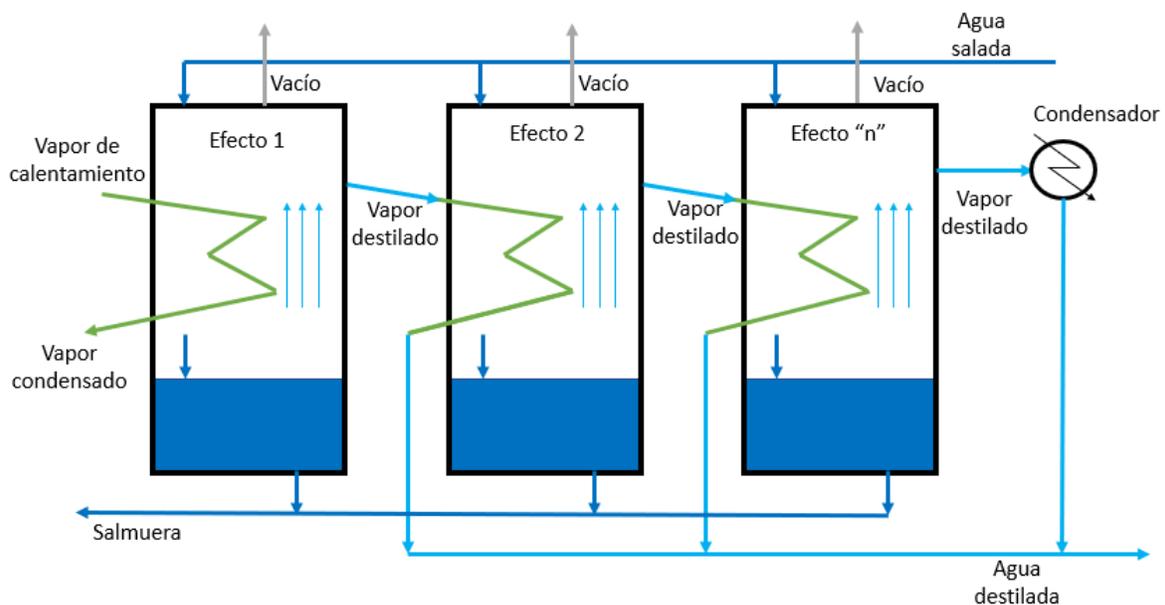


Figura 1. Esquema de proceso MED, elaboración propia a partir de McCabe, 2007.

### 1.2.2. Destilación flash multietapa (MSF)

La evaporación instantánea o flash, consiste en evaporar el agua previamente calentada al pasarla a una cámara o etapa con una presión menor a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del agua alimentada. Esto provoca la expansión súbita del agua al momento en que entra a la cámara, vaporizando agua pura y dejando las impurezas en el fondo del depósito. Por otra parte, se aprovecha la corriente de alimentación de agua salada para condensar el vapor destilado en agua destilada.

El proceso de MSF (Figura 2) se basa en conectar varias etapas con presiones sucesivamente menores para incrementar la eficiencia del proceso. Los procesos de MSF tienen entre 15 y 25 cámaras.

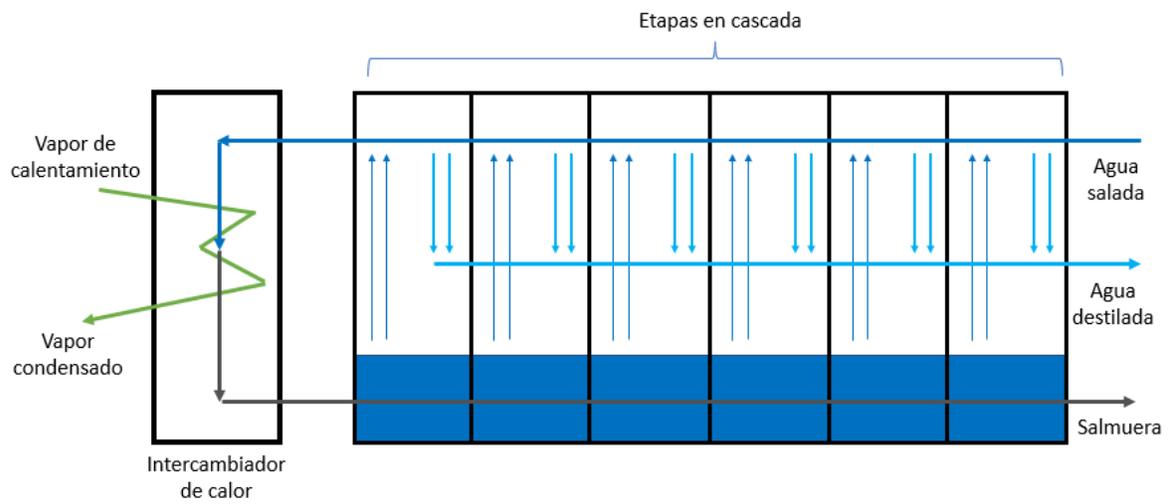


Figura 2. Esquema de proceso MSF, elaboración propia a partir de McCabe, 2007.

## 2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

### 2.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La Organización Internacional de Estandarización (ISO) define al ACV como “una herramienta de análisis en el que se recopilan y evalúan las entradas y salidas, y los potenciales impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida.” (ISO, 2006)

En particular el procedimiento provee una evaluación de un sistema en específico de “la cuna a la tumba”, desde la colecta de la materia prima, la producción, uso, tratamiento, reciclaje y desecho. De tal forma que se puede cuantificar la cantidad de energía usada, el consumo de materia prima, emisiones a la atmosfera y la cantidad de desechos generados. (Curran, 2006)

### 2.2. Antecedentes del ACV

El incremento en la demanda de combustibles y materias primas causado por la diversificación y expansión de las actividades manufactureras ha llevado a aumentar el interés en la sustentabilidad. Las dificultades ambientales que vivimos hoy en día iniciaron a partir del desarrollo social sin precedentes desencadenado por la revolución industrial (Daily, 1992). Mientras que la revolución industrial trajo consigo un incremento en la producción y transporte de bienes, beneficiando de esa forma a la sociedad, también implicó el aumento de los impactos ambientales asociados al uso de combustibles en gran escala (Brauch, 2016).

La revolución industrial fue un punto de inflexión para la ecología de la tierra. Las nuevas tecnologías permitieron aumentar la producción de bienes y mejorar el transporte de estos, al emplear combustibles para generar energía. Estos cambios resultaron en una mejora de las condiciones en la vida diaria de las personas provocando a su vez una explosión demográfica sin precedentes.

Consecuentemente, para mantener a la población creciente se requirió aumentar de igual forma la producción de bienes y servicios para lo que se requería incrementar la producción de energía, generando así un ciclo vicioso en la demanda de combustibles y bienes, y los desechos cuyos procesos productivos generan.

Durante la conferencia de las Naciones Unidas en el Ambiente Humano en Estocolmo 1972, se introdujo la idea del crecimiento económico sin dañar al ambiente. Esta idea con el paso de las décadas fue tomando forma, generando el concepto de desarrollo sustentable. El Informe Brundtland (1987), define como desarrollo sustentable a “aquel que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. (Naciones Unidas, 1987)

Durante la Cumbre de la Tierra de 2002 en Johannesburgo Sudáfrica, se definieron como principios clave para el desarrollo sustentable la conservación del ambiente, el crecimiento económico y la equidad social. De tal forma que se requiere un desarrollo simultaneo y balanceado de cada una de ellas (Goga, 2016).

Por su parte el ACV es una herramienta que tiene sus orígenes durante los años 60's, en un periodo en que se tenía preocupación por las limitaciones en el consumo de fuentes de energía y materia prima. En la Conferencia Mundial de Energía de 1963 Harold Smith reportó sus cálculos de consumo energético para la producción de intermediarios y productos químicos (Curran. 2006).

Aunque fue hasta 1969 que el Instituto de investigación de Midwest (MRI) realizó, para The Coca-Cola Company, uno de los primeros estudios en los que se cuantificaron los recursos requeridos, las emisiones y los desechos producidos por el uso de diferentes contenedores de bebidas. Este estudio tuvo seguimiento en dos estudios realizados en 1974, el primero fue encargado por parte de la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA) y el segundo por Basler y Hofman en Suiza (Guinée, 2011).

Si bien en 1984 Los Laboratorios Federales Suizos para la Ciencia y Tecnología de Materiales (EMPA) presentaron un informe enlistando la información necesaria para realizar un ACV y que introdujo un método para la evaluación de impacto ambiental; fue hasta 1994 que los métodos y procedimientos asociados al ACV empezaron a ser regulados por la ISO en las ISO 14000 (Guinée, 2011).

- ISO 14040 Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de trabajo (2006)
- ISO 14041 Análisis de inventario del ciclo de vida (1998)
- ISO 14042 Evaluación ambiental del ciclo de vida (2000)
- ISO 14043 Interpretación del ciclo de vida (2000)
- ISO 14044 Análisis de ciclo de vida - Requerimientos y guías (2006)

En resumen, el ACV es una técnica para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados con un producto, proceso o servicio, para:

- Desarrollar un inventario de consumo relevante de energía, entrada de materiales y liberaciones al ambiente.
- Evaluar los impactos ambientales potenciales de las entradas y salidas.
- Interpretar los resultados para ayudar a los tomadores de decisiones.

### 2.3. Metodología del ACV

Los análisis de ciclo de vida siguen cuatro pasos, que incluyen la definición del alcance y del objetivo, el análisis de inventario, el análisis del impacto y la interpretación de resultados. La Figura 3 muestra un esquema representativo de los pasos que conforman un ACV, y sus aplicaciones directas.

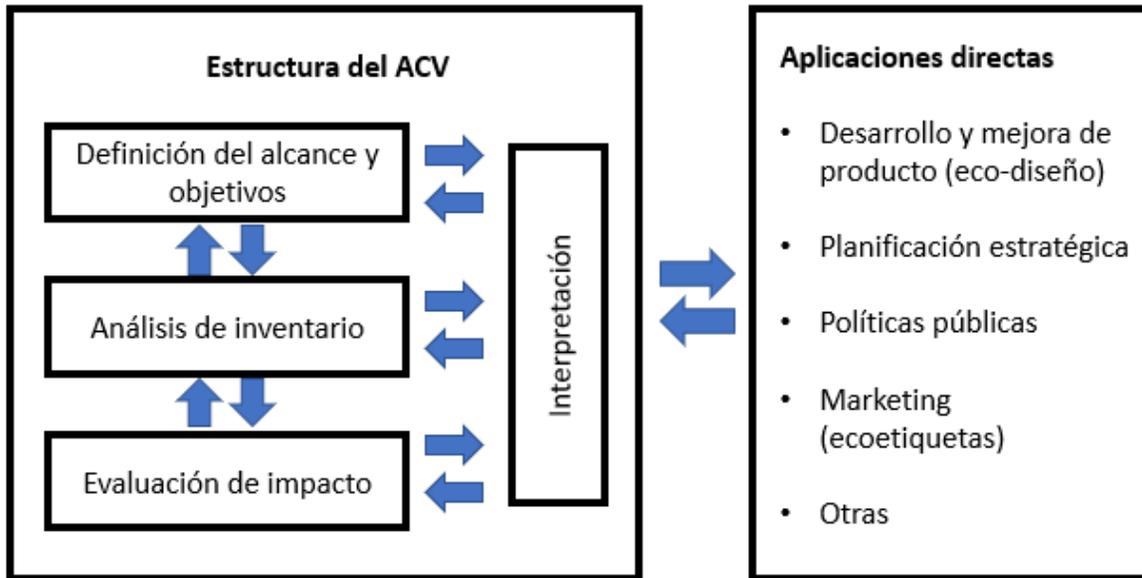


Figura 3. Esquema de la estructura del ACV, recuperado y traducido de Guinée, 2011.

### 2.3.1. Definición de alcance y objetivos.

Este es el primer paso en los ACV. De acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044, este paso debe de explicar claramente la aplicación a la cual se destina el análisis, el motivo de la investigación, la audiencia a la que está destinada, etcétera. En este se define el sistema de estudio al realizar elecciones metodológicas, que son los límites del sistema, la unidad funcional y la distribución (Yu, 2022).

- Límites del sistema. Definir los límites del sistema juega un papel importante en los ACV; ya que, determina el proceso y las actividades que se incluyen en el ACV, además se consideran diferentes factores, tales como, el propósito del estudio, área geográfica afectada, horizonte de tiempo, etc. (Reap, 2008). A grandes rasgos, la mayor parte de los análisis de ciclo de vida definen los límites del sistema a partir de tres etapas, donde se conjuntan los pasos relacionados entre sí. Cabe señalar que son pocos los estudios de ACV que abarcan las tres etapas (Yu, 2022). La Figura 4 muestra un diagrama de flujo para los procesos de desalinización de agua en general.
  - Por lo general en la primera etapa se incluyen todos los pasos y procesos relacionados a la materia prima, aunque dependiendo de los objetivos del estudio también puede abarcar la construcción de la infraestructura empleada en el proceso. Poniendo como ejemplo un proceso de desalinización de agua, la primera etapa abarcaría la generación de energía, productos químicos, fabricación de membranas, construcción de la infraestructura.

- La segunda etapa abarcaría el proceso de transformación por el que pasa la materia prima para que el cliente obtenga el producto terminado. Si se considera el ejemplo anterior, la segunda etapa incluiría el transporte de agua, el pretratamiento, el proceso de desalinización, el almacenamiento y distribución.
- La tercera etapa abarca el reciclaje y disposición de los desechos del producto. Para el ejemplo dado sería la disposición de la salmuera obtenida en el proceso, membranas que ya hayan sido utilizadas, etc.

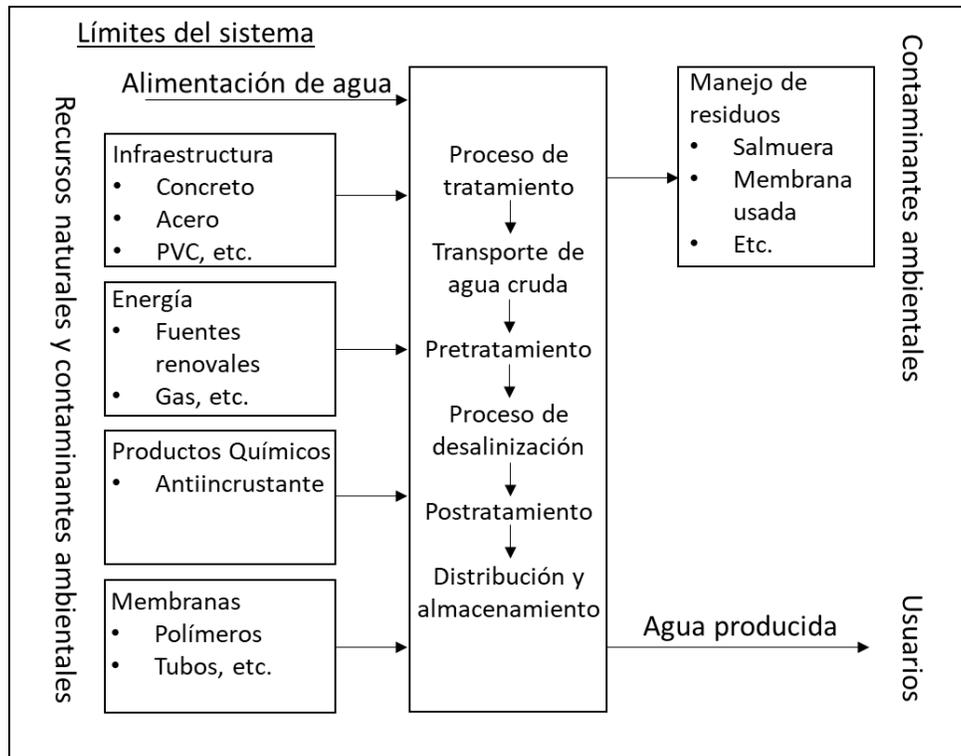


Figura 4. Metodología ACV usada para evaluar los potenciales impactos ambientales de la desalinización. Recuperado y traducido de Zhou, 2014.

- Unidad funcional. La unidad funcional de un ACV es la base de cálculo y de referencia para el mismo, ya que permite la comparación de resultados entre varios escenarios alternativos o productos, incluso tratar sistemas diferentes de forma equivalente (Guinée, 2002). Las unidades funcionales usualmente se dividen en aquellas basadas en energía y aquellas basadas en masa.
- Distribución. La selección de los métodos para distribuir la carga de impacto ambiental de un determinado sistema de producción entre productos y coproductos puede ser un desafío. Cuatro métodos han sido introducidos en la literatura para determinar la distribución del impacto ambiental.

- Sin distribución, donde el producto asume todo el impacto ambiental.
- Distribución económica, que considera que se debe de distribuir con respecto al valor de cada coproducto.
- Distribución basada en la energía o masa asociada a cada uno de los coproductos.
- Expansión del sistema, en el cual se calcula el impacto ambiental al sustraer las emisiones evitadas del total de emisiones, para desplazar a los coproductos.

### 2.3.2. Análisis de inventario.

Es una metodología para estimar el consumo de recursos y los flujos de desechos y emisiones, causados o atribuidos al ciclo de vida de un producto (Rebitzer, 2004). La cuantificación de las entradas de energía y masa, las emisiones y desechos en cada etapa, se calcula a partir de los datos recolectados del sistema de estudio y teniendo en cuenta la unidad funcional.

Los datos empleados para el análisis de inventario deben de ser realistas, significativos y precisos, ya que afectan directamente al ACV. Las fuentes de datos pueden ser primarias o secundarias.

### 2.3.3. Evaluación de impacto.

En este paso los datos recolectados durante el análisis de inventario son empleados para identificar, categorizar y cuantificar los impactos ambientales del proceso. Actualmente, existen varios programas especializados que se emplean para determinar los impactos ambientales de diferentes procesos. Los resultados obtenidos se agrupan en diferentes categorías de impacto ambiental, entre los que se encuentran: potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, potencial de eutrofización, potencial de toxicidad humana, entre otros.

### 2.3.4. Interpretación de resultados.

La interpretación de resultados es una guía, que permite entender a los tomadores de decisiones las incertezas y suposiciones del proceso. Además, se señalan las conclusiones del estudio, así como sus limitaciones y recomendaciones.

Una vez se identifican los puntos significativos basados en los resultados obtenidos, y dependiendo de los objetivos planteados, la ISO 14044 recomienda corroborar los resultados mediante, análisis de sensibilidad, análisis de confianza, análisis de contribución, entre otros. Esta corroboración se realiza para determinar la influencia de variaciones en las suposiciones, métodos y datos, afectan los resultados del estudio.

## 2.4. Programas especializados

Una de las herramientas de apoyo para la elaboración de ACV son los programas especializados, los cuales permiten realizar la evaluación de impacto de los procesos de una forma confiable, para el usuario. Esto se debe no sólo al manejo del programa y su desempeño, sino que también todos los programas cuentan con bases de datos bastante rigurosas y dan acceso a diferentes metodologías para determinar los impactos ambientales asociados a diferentes procesos.

Se debe tener en cuenta que, si bien son una herramienta de gran ayuda, también tienen limitantes, las bases de datos pueden estar demasiado enfocadas a una zona geográfica en particular, dando como resultado que haya un sesgo en estudios realizados en otro lugar. De igual forma la gran mayoría de programas requieren de una licencia de paga, ya sea para el programa o para tener acceso a las bases de datos, limitando el acceso de estos en el sector académico y educativo. También se debe tener en cuenta que, en los programas que ofrecen diferentes métodos para la evaluación de impacto, los resultados obtenidos pueden variar en mayor o menor medida de acuerdo con el método empleado.

### 2.4.1. SimaPro

Es un programa desarrollado por Dutch PRé Consultants en 1989. SimaPro incluye ocho bases de datos entre las que destacan Ecoinvent v3 LCI, European Life Cycle Data, y Swiss input output. (Raluy, 2004).

### 2.4.2. GaBi

GaBi es un programa desarrollado por la Universidad de Stuttgart y distribuido por Sphera, cuenta con una licencia de uso profesional; pero también cuenta con una licencia de uso educacional, que dependiendo de si el solicitante cumple con los requerimientos establecidos, puede tener acceso de forma gratuita.

La licencia profesional de GaBi cuenta con el paquete de datos PE Professional Data Base, que incluye a PE International, European Life Cycle Database y Plastics Europe, con la posibilidad de también adquirir Ecoinvent y US LCI (Zhou, 2014).

### 2.4.3. OpenLCA

OpenLCA es un programa de código abierto y gratuito, desarrollado por GreenDelta en 2006. Permite el acceso a diferentes bases de datos en las que destacan Ecoinvent LCIA methods, Agribalyse, ELCD, entre otros.

## 2.5. Bases de datos

Todos los procesos pueden ser categorizados en *foreground* o *background*. Para un proceso genérico *foreground* incluye los pasos de operación, mientras que *background* se refiere a la construcción de la infraestructura, generación de energía,

producción de materias primas, manejo de residuos, etc. La relación entre *foreground* y *background* son los flujos de referencia, que se refieren a las cantidades de materiales y energía que se aportó a cada paso, al igual que los residuos que cada paso genera. Las conexiones entre el ambiente y el sistema son los flujos elementales, que señalan la cantidad de recursos extraídos del ambiente y los desechos que se descargan a este (Zhou, 2014).

Ya que los ACV intentan dar una visión completa de un producto desde “la cuna hasta la tumba”, el análisis puede rápidamente tener un número abrumador de flujos elementales.

Las bases de datos incorporadas en los programas funcionan como una fuente de importación de datos de los procesos *background*.

### 3. SITIO DE ESTUDIO

#### 3.1. FACULTAD DE QUÍMICA

Ubicada en el campus central de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Química (Figura 5) cuenta con 74,500 metros cuadrados de construcción divididos en siete edificios, 156 laboratorios, 66 salones, cuatro bibliotecas y una hemeroteca, cuatro auditorios, sala de cómputo, sala de videoconferencias, departamento de idiomas, cafetería, etcétera.

En sus aulas se imparten los cursos correspondientes a seis licenciaturas: Química, Ingeniería Química, Ingeniería Química Metalúrgica, Química Farmacéutica Biológica, Química de Alimentos y Química e Ingeniería de Materiales. Sus mapas curriculares constan de nueve semestres e incluyen un total de 50 a 60 asignaturas, 16 de las cuales pertenecen al tronco común.

Actualmente el sitio web de la facultad reporta un total de 8966 alumnos y 1203 académicos. (Facultad de Química, s.f.)



Figura 5. Edificio “A” de la Facultad de Química, recuperado de Patronato de la Facultad de Química, s.f.

### 3.2. LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Con aproximadamente 2300 m<sup>2</sup> el Laboratorio de Ingeniería Química forma parte del plantel central de la Facultad de Química en Ciudad Universitaria. En sus instalaciones se pueden encontrar equipos que permiten a los alumnos tener una relación directa con los fenómenos y procesos que estudian de forma teórica. Si bien la mayor parte de las asignaturas impartidas en el LIQ son específicas del plan de estudios de la carrera de ingeniería química, también se imparten algunas que pertenecen a las materias optativas disciplinarias, así como la realización de servicio social, estancia académica (asignatura con clave 0216) y tesis. (Facultad de Química, s.f.a)

También cuenta con instalaciones que se emplean en diferentes procesos de producción (Figura 6), por ejemplo, se cuenta con una planta piloto para la elaboración de cerveza, una planta para la producción de agua destilada, y durante la pandemia de COVID-19 se produjo gel antiséptico. (Ramírez, 2020)



Figura 6. Interior del Laboratorio de Ingeniería Química, recuperado de Facultad de Química, 2019.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. ELECCIÓN DEL PROCESO DE ESTUDIO

Para el presente trabajo se decidió estudiar el proceso de producción de agua destilada realizado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM, el cual surte actualmente, a la mayor parte de los laboratorios de enseñanza e investigación de la Facultad de Química.

### 4.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el objetivo de tener un mejor entendimiento del proceso general se realizó una revisión bibliográfica que tuviera como enfoque el ACV en procesos similares al llevado a cabo en el LIQ.

En la Tabla 2, se presenta en forma resumida los trabajos más recientes publicados sobre el tema.

Tabla 2. Artículos sobre el ACV de diferentes procesos de destilación de agua.

Autor	Título	Año
Raluy, G., Serra, L., y Uche, J.	Life Cycle Assessment of water production technologies. Part 1: life cycle assessment of different commercial desalination technologies (MSF, MED, RO)	2004
Vince, F., et al	LCA tool for the environmental evaluation of potable water production.	2007
Zhou, J. et al	Life Cycle Assessment for desalination: A review on methodology feasibility and reliability.	2014
Goga T.	A comparative life cycle assessment of water treatment plants using alternative sources of water. (Tesis maestría)	2016

### 4.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTUDIO Y TOMA DE DATOS

Para describir el proceso y poder tomar los datos necesarios para realizar su respectivo balance de materia y energía; se contó con el apoyo del profesor Ricardo Pérez Camacho, Eva Reyna Serrato Duran (alumna de tesis) y los señores Gabriel Ramírez y Guillermo Rodríguez (fogoneros del LIQ).

El proceso consta de tres equipos principales: una caldera, un evaporador de calandria y un condensador. Para un mejor entendimiento se dividirá el proceso en cuatro etapas, cada una correspondiente a cada equipo principal y se agregará una cuarta referente al ablandamiento del agua que ingresa a la caldera.

Como notas importantes se debe mencionar que al momento de la medición la temperatura del agua de pozo fue de 19 °C; de igual forma se midió el flujo de entrada ( $\alpha$ ) general del agua de pozo al Laboratorio de Ingeniería Química, siendo que el flujo másico fue 6102 kg/h y se consideró que al momento de la medición el único proceso activo era la producción de agua destilada.

En el diagrama de la Figura 6 se muestra el seguimiento del proceso citado a continuación:

- **Ablandamiento**

El proceso inicia con una entrada (A) de agua desde el pozo de Ciudad Universitaria a dos tanques (B-01 y B-02) conectados en serie que contienen en su interior zeolita. Estos tanques tienen como objetivo ablandar el agua que entrará a la caldera (CA-01) y que ésta no genere incrustaciones de sales. Una vez que se ablanda el agua, ésta se almacena temporalmente en un tanque (T-01), hasta que se bombea de forma automática a la caldera (B).

- **Generación de vapor de calentamiento**

La caldera (CA-01) funciona con Gas LP, que se suministra de forma constante (B'). Los proveedores de Gas LP son Grupo INFRA y Praxair; para el balance de materia y energía se consideraron las especificaciones de las hojas de seguridad de Grupo INFRA donde menciona que la concentración de propano en su gas licuado es > 99.0 % (Grupo INFRA, 2018).

La caldera tiene cuatro salidas, una salida inferior que regula el nivel de agua en la caldera, una corriente para la emisión de gases y vapores de la combustión (C'), una corriente cuya válvula de seguridad purga automáticamente el exceso de vapor si la presión en la caldera llega a ser mayor a 6 kg/cm<sup>2</sup> y finalmente la corriente (C) con vapor de calentamiento que alimenta directamente al evaporador de calandria (EV-01) al momento de realizar la medición la temperatura fue de 200 °C.

- **Evaporación**

El evaporador de calandria (EV-01) cuenta con dos entradas, la primera es la entrada (C) del vapor de calentamiento y la segunda es la entrada (D) de agua desde el pozo de Ciudad Universitaria. El evaporador cuenta con la siguiente configuración, por tubos circula el agua y por la coraza el vapor de calentamiento. El vapor de calentamiento (C) se condensa en el evaporador y a su salida (R) es recirculado a la entrada de agua (D) para aumentar la eficiencia de este proceso. La salida (E) se encuentra en la parte superior del evaporador y lleva el vapor destilado hasta el condensador (E-01). Cabe destacar que el evaporador cuenta con una segunda salida (S) en la base de éste, por donde se desechan los fondos correspondientes a la salmuera, pero esto sólo se realiza cuando se le da

mantenimiento al proceso. Durante el mantenimiento, se pasa una disolución de ácido acético por el evaporador y el condensador, con el objetivo de remover las sales incrustadas en estos.

- Condensación

El condensador (E-01) es un intercambiador de coraza y tubos horizontal, por coraza circula el vapor destilado y por tubos circula el agua de enfriamiento, que de igual forma proviene del pozo de Ciudad Universitaria (G). El condensador tiene dos salidas la primera es el producto del proceso, el agua destilada (F), esta pasa a un tanque de almacenamiento (T-02) y de ahí se distribuye a los laboratorios de la Facultad de Química; al momento de la medición la temperatura fue de 90 °C y su flujo másico de 432 kg/h. La segunda salida corresponde a la salida del agua de enfriamiento (H), ésta se desecha al drenaje, al momento de la medición la temperatura fue de 57 °C y su flujo másico de 5700 kg/h.

El diagrama de flujo de proceso se muestra en el capítulo de resultados.

#### 4.4. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

##### 4.4.1. Definición de objetivo y alcance

Objetivo: Realizar el ACV de la producción de agua destilada en el Laboratorio de Ingeniería Química de la UNAM, mediante el uso de los balances de materia y energía y el uso de los programas GaBi Education, OpenLCA y SimaPro; para conocer los impactos ambientales de este proceso e identificar posibles mejoras.

Alcance: El alcance abarca sólo el proceso realizado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química, es decir desde la entrada de agua proveniente del pozo de Ciudad Universitaria hasta la producción de agua destilada.

##### 4.4.2. Análisis de inventario

A partir de la descripción del proceso y la toma de datos se realizó el diagrama de flujo del proceso (Figura 7) y posteriormente el balance de materia y energía. De igual forma se definió como unidad funcional del proceso 432 litros de agua destilada que, de acuerdo con los datos tomados, es la cantidad producida en una hora.

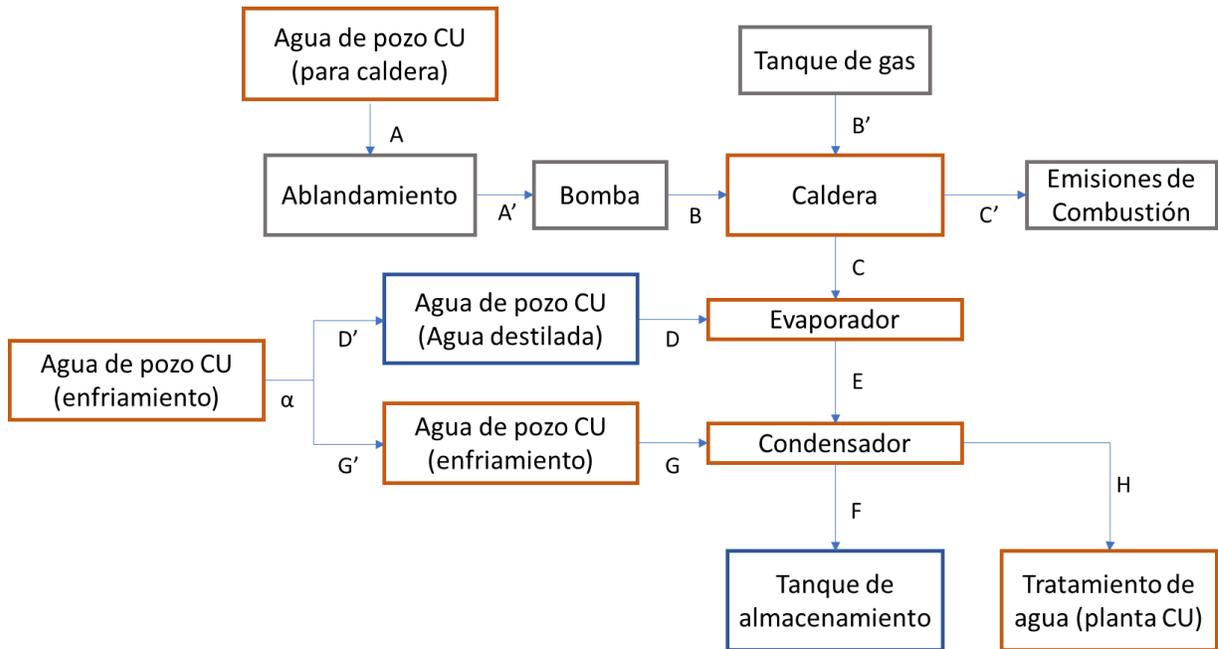


Figura 7. Diagrama del proceso de producción de agua destilada.

#### 4.4.3. Evaluación de impacto

Para la evaluación del impacto ambiental se utilizaron los resultados obtenidos en el balance de materia y energía, al igual de una versión adaptada del diagrama de flujo del proceso que serviría como base para el planteamiento del proceso en los diferentes programas. Esta versión adaptada incluye: la zeolita, gas natural y electricidad como entradas en sus respectivas etapas.

La Figura 8 muestra el diagrama de bloques adaptado sobre la producción de agua destilada.

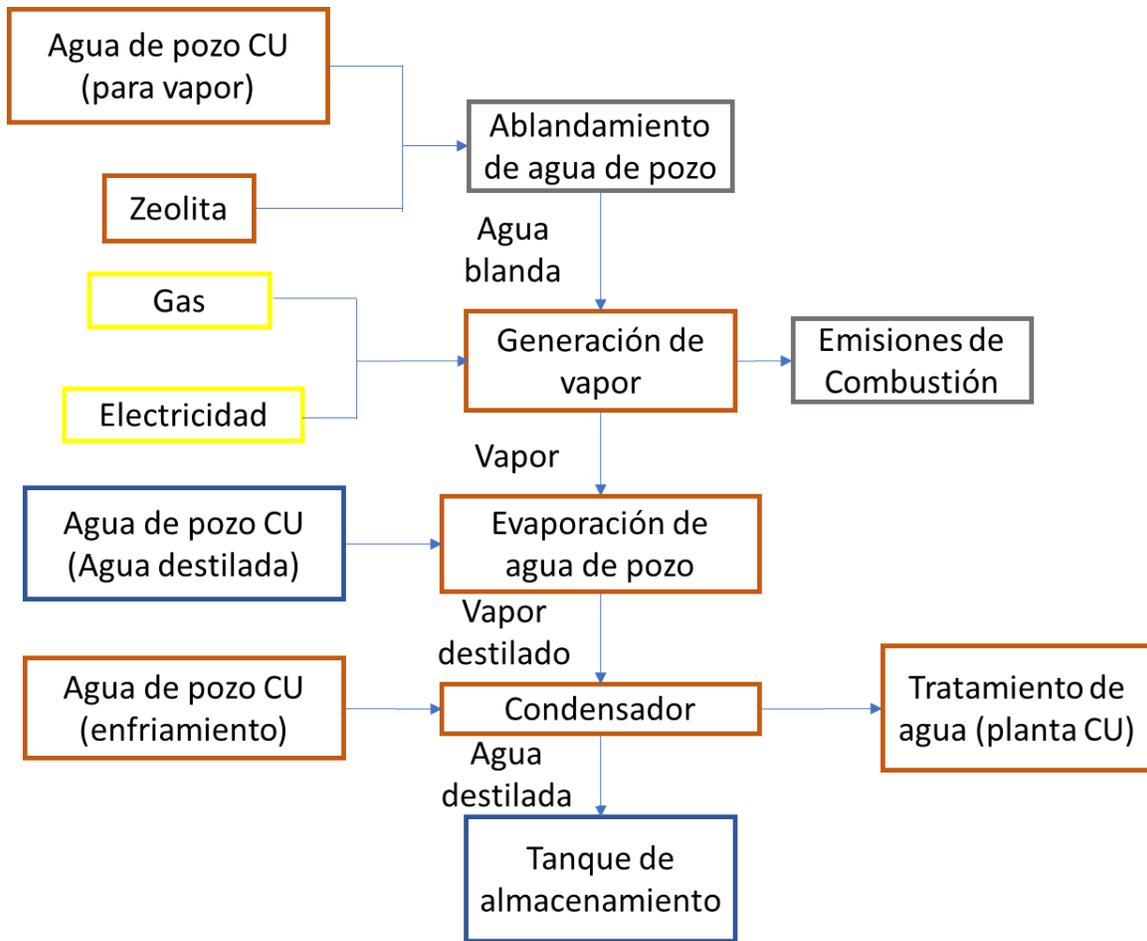


Figura 8. Diagrama adaptado del proceso de producción de agua destilada.

#### 4.4.4. ACV mediante balance de materia y energía

Para esta etapa se empleó como referencia el trabajo de Cárdenas L., D. & Romero M., I. (2019), tomando en consideración que los indicadores usados en su trabajo fueron: potencial de calentamiento global a 100 años, toxicidad humana, potencial de acidez y potencial de eutrofización, y que hace referencia a los factores de emisión para los cálculos de impacto ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014.

#### 4.4.5. ACV mediante programas

Para esta etapa se empleó GaBi Education 2020 que es la versión gratuita del programa para la realización de ACV de Sphera; OpenLCA 1.11.0 que es un programa de código abierto gratuito para el ACV; y se tuvo la oportunidad de tener acceso a SimaPro 7, el programa para ACV de PRé.

Para poder realizar una comparación con los resultados obtenidos en el ACV mediante el balance de materia y energía se utilizó la metodología de cálculo *CML baseline*, ya que está disponible en los tres programas y entre los resultados se obtienen los indicadores: potencial de calentamiento global a 100 años, toxicidad humana, potencial de acidez y potencial de eutrofización.

El siguiente capítulo muestra los resultados obtenidos del presente trabajo, la presentación del diagrama de flujo de procesos, los balances de materia y energía, los cálculos de eco-indicadores a partir de los parámetros encontrados en la literatura, y los resultados propios del análisis de ciclo de vida.

## 5. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

En este capítulo se presentan en mayor profundidad los diferentes aspectos mencionados con anterioridad haciendo énfasis en los resultados obtenidos. Para una mejor explicación este capítulo se dividirá conforme a los pasos correspondientes al ACV con excepción de la Definición del Alcance y Objetivos ya que éste se encuentra detallado en el capítulo anterior.

### 5.1. ANÁLISIS DE INVENTARIO

Como se describió anteriormente una vez definidos tanto el objetivo como el alcance del estudio, se procedió a realizar una visita al sitio del proceso de estudio, en este se tomaron las mediciones de temperatura y flujo de las corrientes de salida de agua destilada (H), desecho de agua de enfriamiento (F), entrada general de agua de pozo al LIQ ( $\alpha$ ); al igual que la temperatura de vapor de calentamiento (C).

Posteriormente, se determinaron las medidas de los tanques de ablandamiento que contienen zeolita, para determinar su volumen y realizar un estimado del consumo de zeolita considerando que el material se sustituye de forma anual.

De igual forma se revisó la ficha técnica de la bomba (BA-01) que alimenta con agua a la caldera, para determinar el consumo eléctrico de ésta.

Una vez se realizó el recorrido y se tomaron las mediciones y se realizó el diagrama de proceso (DFP) mostrado en la Figura 9, la descripción del proceso se encuentra en el capítulo anterior.

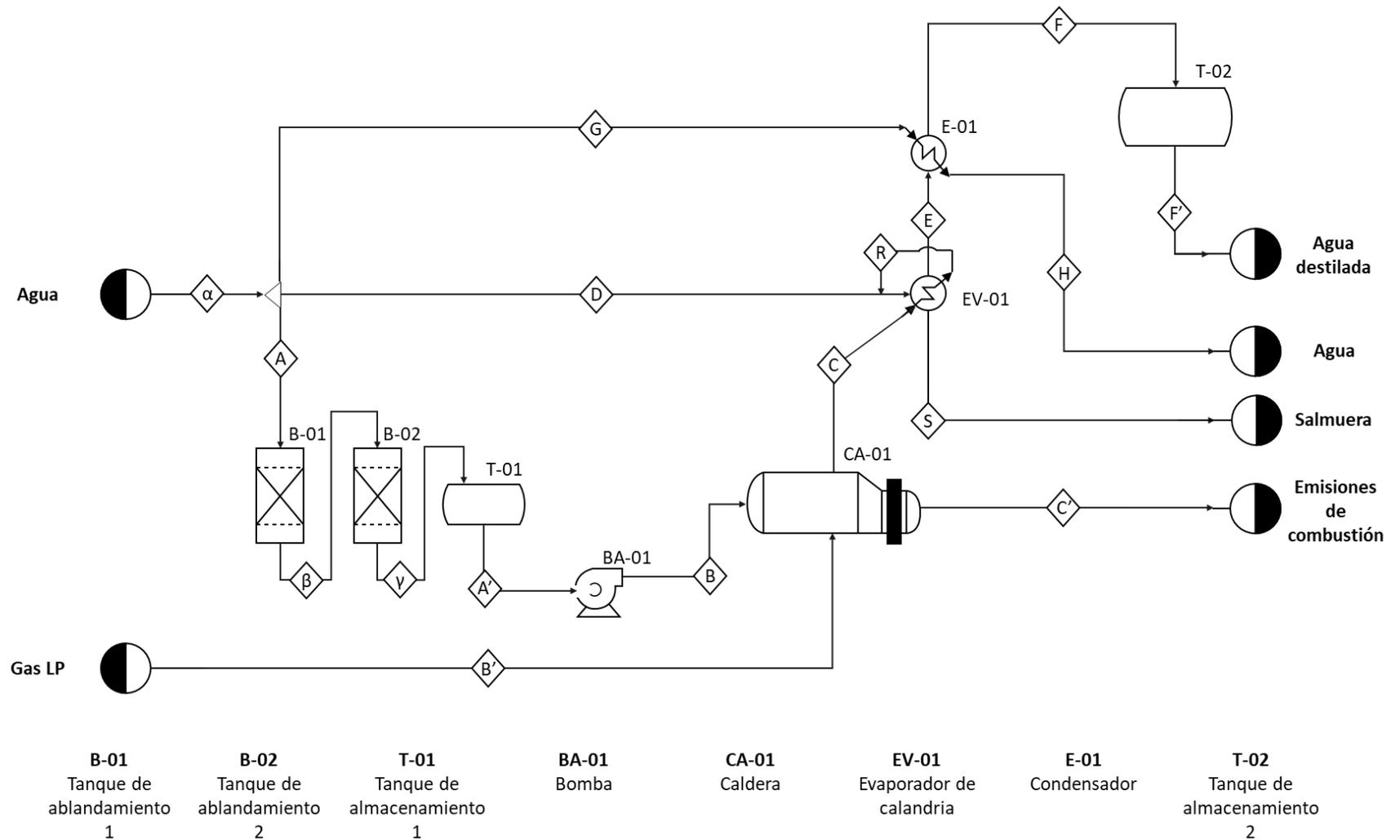


Figura 9. DFP de la producción de agua destilada realizada en el LIQ.

Una vez que se recopilaron todos los datos del proceso se procedió a realizar el balance de materia y energía del proceso. Cabe mencionar, nuevamente, que se tomó como unidad funcional 432 kg de agua destilada, ya que es la cantidad producida por hora.

El balance de materia y energía se basó en los datos recolectados del proceso, como se mencionó anteriormente. También se debe tomar en consideración que se hicieron las siguientes suposiciones:

- Al momento de tomar las mediciones el único proceso en operación fue la destilación de agua, por lo que la entrada general de agua de pozo ( $\alpha$ ) al LIQ, sólo alimenta a este proceso.
- Ya que la caldera es alimentada mediante un lazo de control cada vez que el nivel de agua alcanza una altura determinada se consideró que al momento de la medición ( $\alpha$ ) no alimenta al sistema de ablandamiento (A).
- A partir de las hojas de seguridad de GRUPO INFRA, la alimentación de gas LP (B') a la caldera se compone totalmente de propano.
- Debido a la falta de datos y teniendo en cuenta que cada semestre se realiza un mantenimiento general tanto a la caldera como a la línea de producción, se consideró que la caldera realiza una combustión completa de gas LP, por lo que no hay presencia de monóxido de carbono en las emisiones que genera.
- Se consideró que no hay pérdidas de calor a lo largo de la tubería que alimenta vapor de calentamiento (C) al evaporador de calandria.
- Debido a que el evaporador de calandria opera con una recirculación del vapor condensado (R) para aumentar la eficiencia del proceso, como se mencionó en el capítulo anterior, se consideró en el balance como una caja negra, ya que no se cuentan con los datos necesarios para determinar la recirculación, de igual forma se desconoce el nivel de agua al cual opera.
- Continuando con el evaporador de calandria la salida de la salmuera (S) no forma parte del balance de materia y energía ni del ACV ya que, este flujo sólo se encuentra operativo durante el mantenimiento de los equipos.

El cálculo se inició a partir del bance de materia del condensador, ya que se conocen los valores del agua destilada (F) y la salida del agua de enfriamiento (H).

$$H = G$$

$$F = E$$

Ecuación 1. Balance de materia del condensador (E-01)

Posteriormente se determinó el calor que el vapor destilado (E) cede al agua de enfriamiento (H) y debido a la conservación de la energía se determina la temperatura del vapor destilado (E).

$$Q_H = m_H C p_H (T_H - T_G)$$

$$Q_H = -Q_E$$

$$T_E = T_F + \frac{Q_E - m_E \lambda_E}{m_E C p_E}$$

Ecuación 2. Balance de energía del condensador (E-01)

Una vez determinados el flujo de alimentación general de agua al laboratorio ( $\alpha$ ) y el flujo de desecho de agua de enfriamiento (H), se calculó la alimentación de agua (D) al evaporador de calandria. Una vez obtenido el flujo de alimentación (D) y conociendo el flujo de salida de agua destilada (F), se calculó el flujo de vapor de calentamiento (C) suministrado al evaporador de calandria.

$$D = \alpha - H$$

$$E = F$$

$$C = E - D$$

$$C = A$$

Ecuación 3. Balance de materia del evaporador de calandria

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos del balance de materia y energía, considerando las suposiciones y cálculos antes mencionados.

Tabla 3. Tabla de resultados del balance de materia y energía del proceso

Corriente	A'	B	B'	C	D	E	F	G	H
Componente	Agua	Agua	Gas LP	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Agua	Agua
Flujo másico [kg/h]	30	30	5.14	30	402	432	432	5700	5700
Flujo molar [mol/h]	1667	1667	117	1667	22333	24000	24000	316667	316667
Temperatura [K]	297.15	297.15	297.15	478.15	297.15	446.91	368.15	297.15	335.15
Temperatura [°C]	19	19	19	200	19	169	90	19	57

Una vez determinado el flujo de vapor de calentamiento (C), se calculó la energía de esta corriente, ya que se conoce su temperatura, la entalpía de vaporización del agua se puede obtener de la literatura y la conservación de la materia nos permite determinar la alimentación de agua a la caldera (B).

$$Q_C = m_B c_{p_B} (T_C - T_B) + m_B \lambda_B$$

Ecuación 4. Balance de energía de la caldera

A partir del poder calorífico del gas LP en la literatura y aplicando la eficiencia de la caldera reportada por el fabricante, se calculó la alimentación de gas LP (B') a la caldera.

$$B' = \frac{Q_C}{0.4 * 0.89 * P.C_{gas LP}}$$

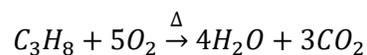
Ecuación 5. Cálculo de consumo de gas LP.

En la Tabla 4 se puede observar los resultados obtenidos al aplicar el balance de energía.

Tabla 4. Determinación de consumo de gas de la caldera (CA-01).

Flujo de gas	5.14	kg/h
Eficiencia caldera	0.4	
Eficiencia quemador	0.89	
Calor	9.09E+04	kJ/h
PC	49651.53	kJ/kg

Posteriormente se realizó el balance de la reacción de combustión del propano para determinar las emisiones (C') asociadas a la generación de vapor de calentamiento.



Ecuación 6. Reacción de combustión completa de propano.

La Tabla 5 muestra los resultados del balance de la reacción de combustión que se emplearon para la evaluación de impacto.

Tabla 5. Flujos másicos asociados a la combustión de propano

	Componente	Flujo másico [kg/h]
Entradas	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.14
	O <sub>2</sub>	18.70
Salidas	CO <sub>2</sub>	15.42
	H <sub>2</sub> O	8.41

Finalmente se utilizaron los datos de la ficha técnica de la bomba para determinar el consumo de electricidad y se utilizaron las medidas de los tanques de ablandamiento para dar una estimación del gasto de zeolita.

La Tabla 6 muestra el rendimiento de la bomba y los datos empleados para el cálculo.

Tabla 6. Determinación del rendimiento de la bomba (BA-01)

Bomba Sentinel		
RPM	3600	
Dif. Potencial	220	V
Intensidad de corriente	8.8	A
Potencia	1936	W
Potencia	1.936	kW
Tiempo	0.083333	h
Rendimiento	0.161333	kWh

La Tabla 7 muestra la cantidad de zeolita empleada en los tanques de ablandamiento, considerando que la zeolita se cambia cada año se puede obtener como resultado una estimación de su consumo.

Tabla 7. Determinación de consumo de zeolita

Tanques de zeolita	
14x65	in
35x165	cm
154	litros
0.154	m <sup>3</sup>
1	año
3650	h
2400	kg/m <sup>3</sup>
739.2	kg
0.202521	kg/h

## 5.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO

Para la evaluación de impacto ambiental se emplearon los datos obtenidos mediante el balance de materia y energía del proceso. En este trabajo se realizó este paso de dos formas la primera empleando una hoja de cálculo y los factores de conversión reportados en la literatura; y la segunda empleando programas especializados.

### 5.2.1. Evaluación de impacto en hoja de cálculo

Una vez terminado el balance de materia y energía, se determinaron los impactos ambientales asociados al proceso. Para esto, se investigaron los factores asociados a los procesos de destilación, los cuales se emplearon para determinar las emisiones del proceso.

La Tabla 8 muestra los factores para calcular las emisiones de los diferentes gases asociados a los procesos de destilación.

Tabla 8. Factores de conversión para procesos de destilación recuperado de SEMARNAT, (s.f).

Gas	Factor	
CO <sub>2</sub>	1586.4	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> gas LP
CO <sub>2</sub>	0.788	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> agua
CO <sub>2</sub>	0.000582	kg CO <sub>2</sub> /Wh electricidad
SO <sub>2</sub>	42	g SO <sub>2</sub> /Wh electricidad
SO <sub>2</sub>	4.61E-07	kg SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> gas LP
NO <sub>x</sub>	18	g NO <sub>x</sub> /Wh electricidad
NO <sub>x</sub>	1.656	kg NO <sub>x</sub> /m <sup>3</sup> gas LP
CH <sub>4</sub>	0.02	kg CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> gas LP
N <sub>2</sub> O	0.11	kg N <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> gas LP

Una vez que se tienen los factores reportados en la literatura se realizó, para cada uno de los gases descritos, la suma de los productos de los factores correspondientes a cada gas por el resultado correspondiente del balance de materia y energía del proceso.

$$m_{gas_i} = \sum factor_{gas_i} * resultado\ BMyE$$

Ecuación 7. Cálculo general para obtener la masa de gases contaminantes

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos para los diferentes gases contaminantes.

Tabla 9. Emisiones de gases contaminantes asociados a la producción de agua destilada

kg CO <sub>2</sub>	kg SO <sub>2</sub>	kg NO <sub>x</sub>	kg CH <sub>4</sub>	kg N <sub>2</sub> O
19.94	6.78E-03	1.87E-02	0.00019	0.001047

Una vez determinadas las emisiones correspondientes a los gases, se emplearon los factores de cada categoría de impacto ambiental asociados a cada gas, los cuales se presentan en el presente trabajo en las tablas 10 a 13. Para el presente trabajo se emplearon las categorías de potencial de calentamiento global a 100 años, potencial de toxicidad, potencial de acidificación y potencial de eutrofización.

Tabla 10. Factores de potencial de cambio climático a 100 años, recuperado de Heijungs, 1992.

Potencial de Calentamiento Global	
Contaminante	WPG <sub>100</sub>
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	11
N <sub>2</sub> O	270

$$PCG_{100} = \sum \text{Emisión } gas_i * \text{factor } gas_i WPG_{100} [=] kg CO_2 eq$$

Ecuación 8. Determinación de potencial de calentamiento global.

Tabla 11. Factores de toxicidad humana, recuperado de Heijungs, 1992.

Potencial de toxicidad humana	
Contaminante	F(TH)
1,4-diclorobenceno (1,4-DCB)	1
NO <sub>x</sub>	8.041
SO <sub>2</sub>	12.37

$$TH_{100} = \sum \text{Emisión } gas_i * \text{factor } gas_i F(TH) [=] kg 1,4 - DCB eq$$

Ecuación 9. Determinación de potencial de toxicidad humana.

Tabla 12. Factores de potencial acidificación, recuperado de Heijungs, 1992.

Potencial de acidificación	
Contaminante	F(PA)
NO <sub>x</sub>	0.7
SO <sub>2</sub>	1

$$PA = \sum \text{Emisión } gas_i * \text{factor } gas_i F(PA) [=] kg SO_2 eq$$

Ecuación 10. Determinación de potencial de acidificación.

Tabla 13. Factores de potencial de eutrofización, recuperado de Heijungs, 1992.

Potencial de Eutrofización	
Contaminante	F(PE)
NO <sub>x</sub>	0.13
(PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup>	1

$$PE = \sum Emisión_{gas_i} * factor_{gas_i} F(PE) [=] kg PO_4^{3-} eq$$

Ecuación 11. Determinación de potencial de eutrofización.

### 5.2.2. Evaluación de impacto en programas especializados

Como ya se comentó con anterioridad en el marco teórico, los programas especializados son una herramienta que ayuda a los usuarios a realizar la evaluación de impacto ambiental de diferentes procesos, en parte gracias a sus bases de datos y biblioteca de métodos de cálculo.

El presente trabajo se enfocó en realizar la comparación de los impactos resultantes al emplear tres de los programas disponibles, GaBi Education, SimaPro 7, y OpenLCA. Esta comparación aprovecha el estar realizando el ACV de un mismo proceso, la producción de agua destilada, por lo que la alimentación de datos fue la misma, otra de las variables que se tiene es el método de purificación que los programas emplean para realizar los cálculos, por lo que se ha empleado el método CML 2001, ya que está disponible en los tres programas, de tal forma que la variable más importante que el resto, es precisamente la base de datos de cada programa.

Debido a que este trabajo no tiene como objetivo el instruir sobre el uso de los programas en sí, se obviarán los pasos en cada uno y se dará una explicación general bastante simplificada de su uso.

Una vez que se tiene acceso al programa en cuestión, es una buena práctica revisar que se cuente con la base de datos y ésta esté operativa. Después el programa pide que creamos un nuevo proceso, cada programa tiene sus propias especificaciones para este paso. Todos los programas incluyen diferentes etapas u operaciones, al igual que flujos elementales, pero en caso de no encontrar un elemento en específico, este puede ser creado siempre y cuando se cuenten con todas las especificaciones correspondientes.

Cada programa dispone de sus respectivas opciones para armar el proceso deseado, algunos tienen interfaces más amigables para el usuario que otros, pero

en sí es el mismo proceso. Es importante que al armar el proceso se estén alimentando los datos del proceso, ya sea que se hayan obtenido mediante el balance de materia y energía correspondiente o mediante la investigación bibliográfica. De igual forma, se le pide al usuario especificar la unidad funcional del proceso.

Una vez que el proceso este completamente armado y debidamente llenado, se puede correr la simulación para el cálculo de los indicadores de impacto ambiental, y de forma automática se despliegan los resultados ya sea en forma gráfica o en tablas.

En las Figuras 10, 11 y 12, se muestran esquemas de cómo se mostró el proceso de producción de agua destilada en los programas: GaBi Education, OpenLCA y SimaPro 7 respectivamente.

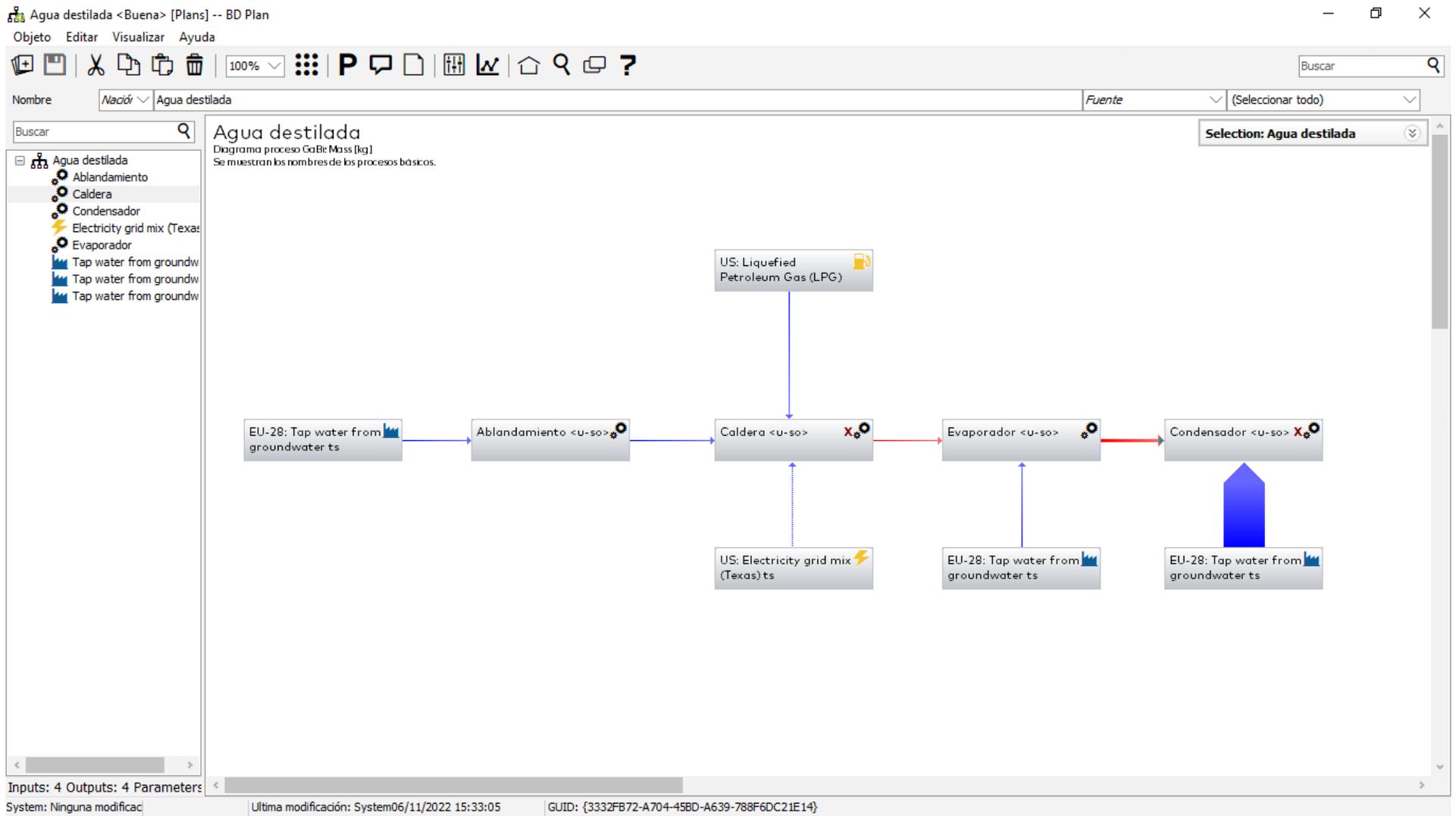


Figura 10. Proceso para la producción de agua destilada en GaBi Education.

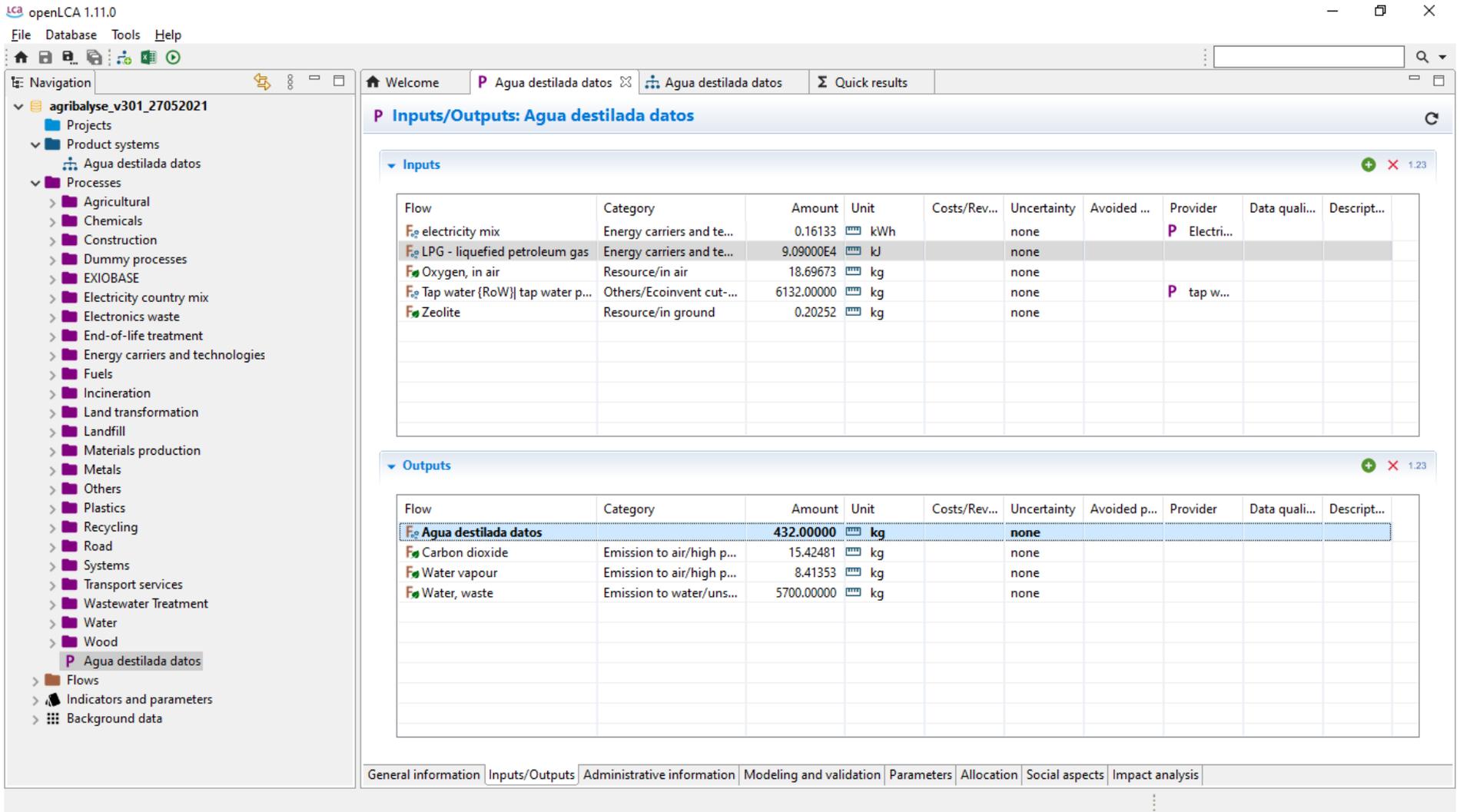


Figura 11. Proceso para la producción de agua destilada en OpenLCA.

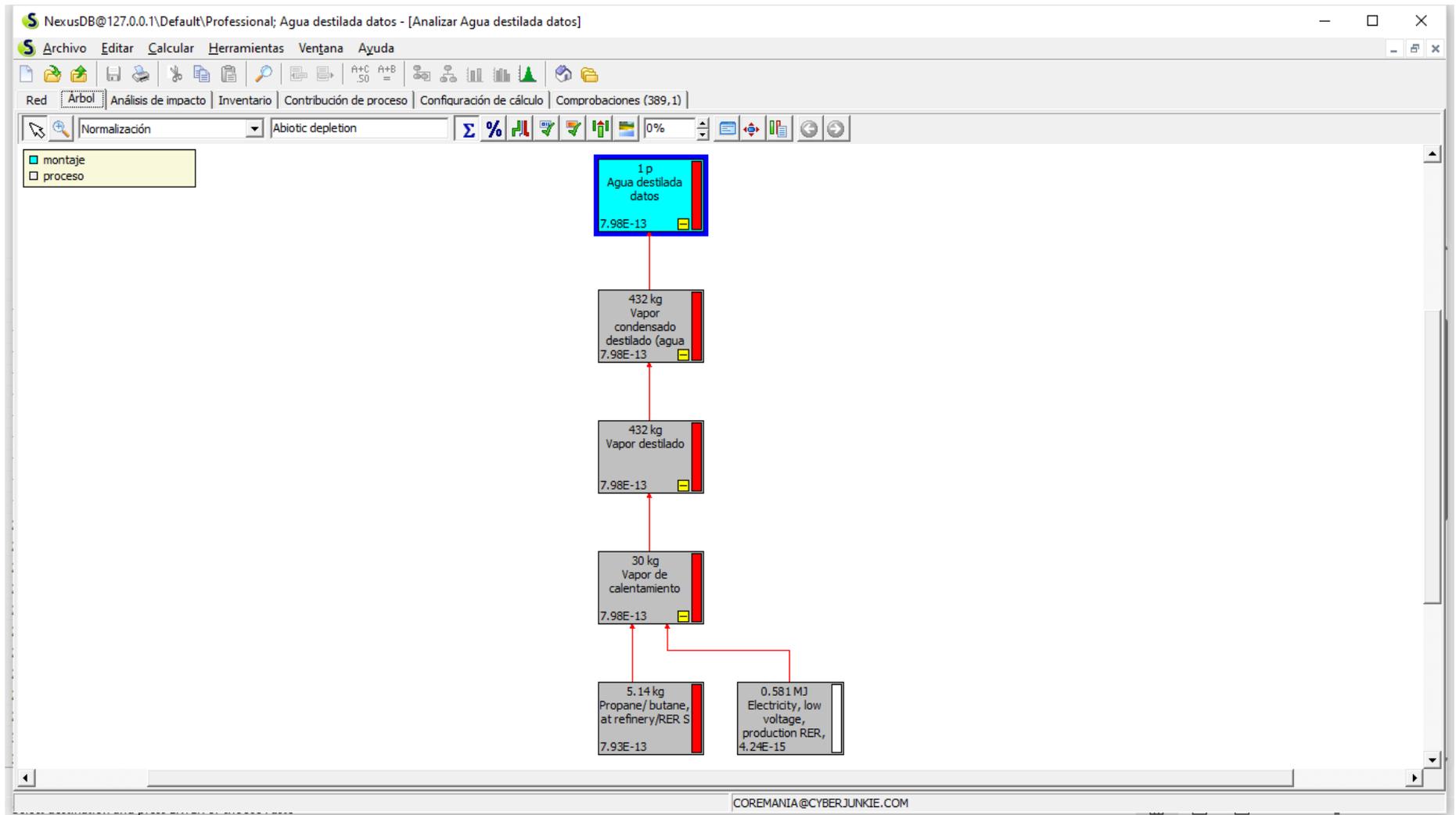


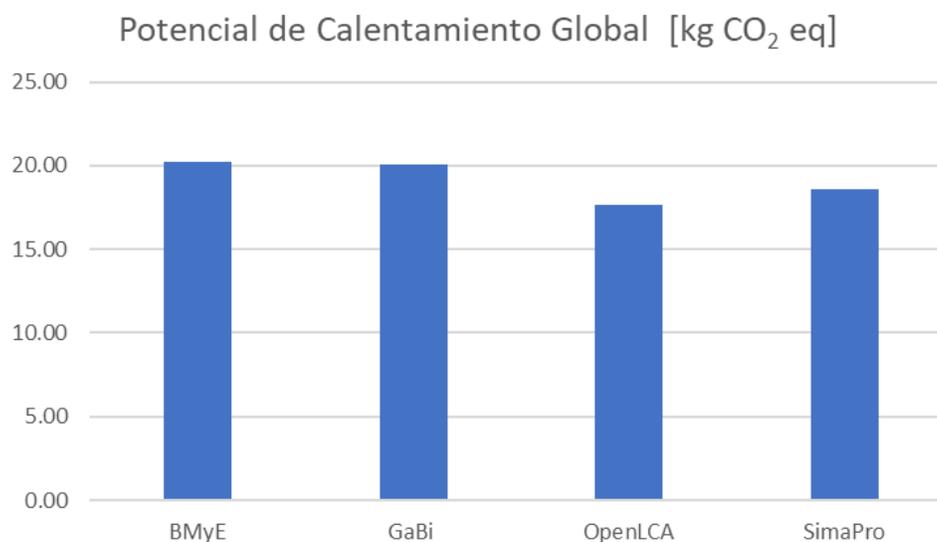
Figura 12. Proceso para la producción de agua destilada en SimaPro 7.

En la tabla 14, se presentan los resultados del ACV obtenidos mediante el uso de factores reportados en la bibliografía, al igual que los resultados obtenidos a partir del uso de los programas especializados.

Tabla 14. Resultados obtenidos del ACV para la producción de agua destilada.

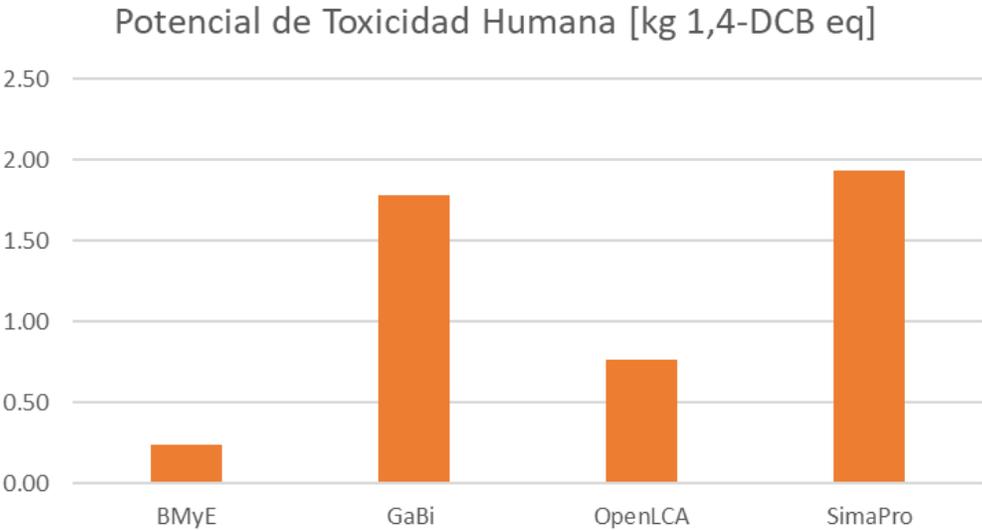
Resultados ACV				
Indicador	BMyE	GaBi	OpenLCA	SimaPro
Potencial de Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	20.22	20.10	17.62	18.61
Potencial de Toxicidad Humana [kg 1,4-DCB eq]	0.23	1.78	0.77	1.93
Potencial de Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	0.0198	0.0092	0.0099	0.0356
Potencial de Eutrofización [kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq]	2.4E-03	3.4E-03	3.9E-03	3.1E-03

En la Gráfica 1 se presenta el comparativo de los resultados obtenidos para el potencial de calentamiento global mediante los factores reportados en la bibliografía y el uso de programas especializados.



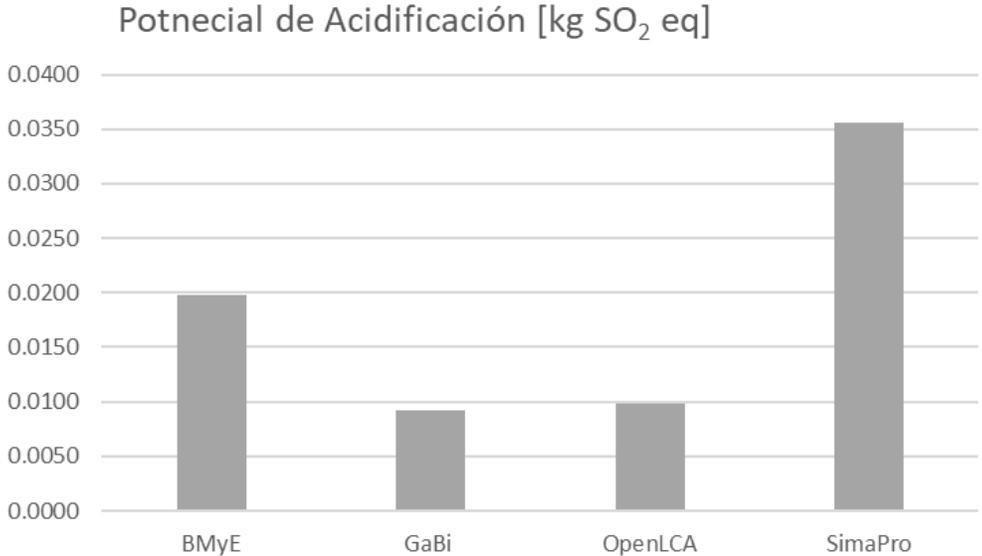
Grafica 1. Comparación de los resultados obtenidos para potencial de calentamiento global a 100 años.

En la Gráfica 2 se presenta el comparativo de los resultados obtenidos para el potencial de toxicidad humana mediante los factores reportados en la bibliografía y el uso de programas especializados.



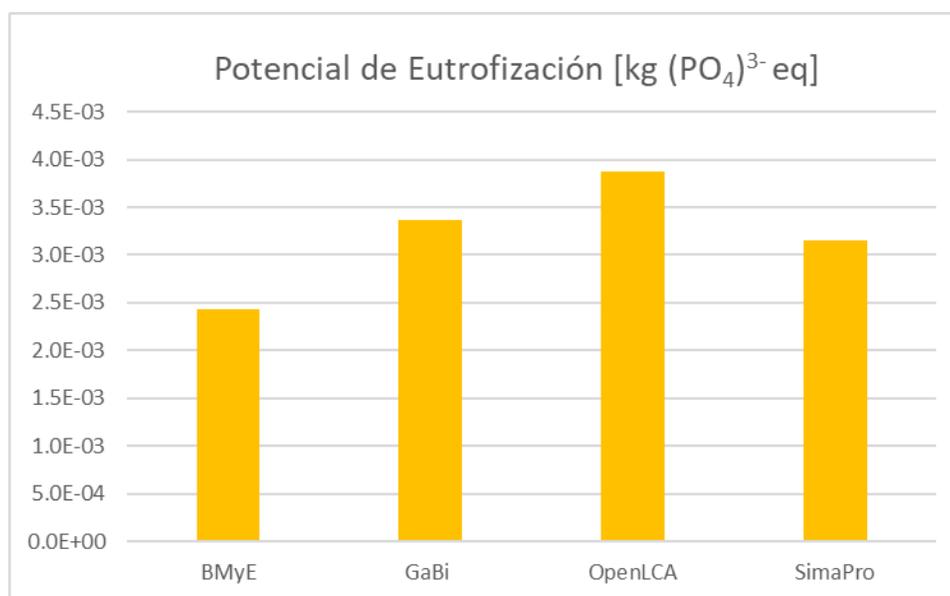
Grafica 2. Comparación de los resultados obtenidos para potencial toxicidad humana.

En la Gráfica 3 se presenta el comparativo de los resultados obtenidos para el potencial de acidificación mediante los factores reportados en la bibliografía y el uso de programas especializados.



Grafica 3. Comparación de los resultados obtenidos para potencial acidificación.

En la Gráfica 4 se presenta el comparativo de los resultados obtenidos para el potencial de eutrofización mediante los factores reportados en la bibliografía y el uso de programas especializados.



Grafica 4. Comparación de los resultados obtenidos para potencial eutrofización.

Se debe mencionar también al potencial de ecotoxicidad de agua marina, un indicador que no forma parte de la comparación, debido a que, lamentablemente, no se pudieron obtener de fuentes bibliográficas los factores requeridos para realizar los cálculos correspondientes, por lo que sólo se cuenta con los resultados obtenidos en los programas SimaPro y OpenLCA. El potencial de ecotoxicidad de agua marina forma parte de los resultados obtenidos mediante CML 2001 baseline. En la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos en SimaPro, en ésta se puede apreciar que el valor de ecotoxicidad de agua marina es de 1460 kg 1,4-DCB eq.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Vapor condensado destilado (agua
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1.46E3	1.46E3
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	18.6	18.6
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1.93	1.93
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.203	0.203
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.126	0.126
Acidification	kg SO2 eq	0.0356	0.0356
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.0154	0.0154
Eutrophication	kg PO4--- eq	0.00315	0.00315
Photochemical oxidation	kg C2H4	0.00196	0.00196
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2.43E-6	2.43E-6

Figura 13. Resultados obtenidos en SimaPro 7.

Por otra parte, el valor de ecotoxicidad de agua marina obtenido con OpenLCA (Figura 14) fue de 3110.92 kg 1,4-DCB eq, mostrando una diferencia importante con respecto al obtenido con SimaPro. Aun así, muestra que la corriente con una mayor contribución es el agua de pozo (subterránea).

▼ Impact analysis: CML-IA baseline

Subgroup by processes  Don't show < 1 %

Name	Category	Impact result	Unit
> Photochemical oxidation		0.00040	kg C2H4 eq
> Human toxicity		0.76519	kg 1,4-DB eq
> Global warming (GWP100a)		17.62125	kg CO2 eq
> Abiotic depletion (fossil fuels)		9.96805	MJ
> Ozone layer depletion (ODP)		1.07246E-7	kg CFC-11 eq
> Abiotic depletion		7.62320E-7	kg Sb eq
> Fresh water aquatic ecotox.		0.76969	kg 1,4-DB eq
> Eutrophication		0.00387	kg PO4--- eq
▼ Marine aquatic ecotoxicity		3110.91877	kg 1,4-DB eq
> P tap water production, underground water with	Others / Ecoinvent cut-off S copy	3069.27510	kg 1,4-DB eq
> P Electricity Mix, consumption mix, at consumer,	Energy carriers and technologie...	31.30022	kg 1,4-DB eq
> Acidification		0.00985	kg SO2 eq
> Terrestrial ecotoxicity		0.00385	kg 1,4-DB eq

Figura 14. Resultados obtenidos en OpenLCA.

### 5.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los cuatro métodos dan resultados bastante semejantes para el potencial de calentamiento global, y similares para el potencial de eutrofización; sin embargo, hay diferencias importantes para el potencial de acidificación y el potencial de toxicidad humana. En cuanto a potencial de toxicidad humana hay cierta semejanza entre GaBi y SimaPro, mientras que para potencial de acidificación los resultados de GaBi y OpenLCA son bastante similares; y en ambos indicadores parece que SimaPro tiene los parámetros más estrictos. Por su parte los resultados obtenidos a partir de los factores reportados en la literatura para el potencial de toxicidad humana son muy bajos.

Con respecto a la ecotoxicidad de agua marina, sí bien no se pudo realizar la comparación entre los diferentes métodos debido a la falta de datos bibliográficos; y teniendo en cuenta la diferencia en los resultados de programa a, se puede decir, que el uso de agua de pozo puede tener un impacto ambiental importante y se debe de tener en cuenta que, el proceso de tratamiento de agua no forma parte del alcance del presente trabajo.

Hay que tener en cuenta que GaBi Education y OpenLCA, son de origen alemán y SimaPro es un programa holandés, por su parte los factores bibliográficos consultados fueron publicados por la SEMARNAT en México. La diferencia en los resultados puede ser debido a que las bases de datos están especificadas para las normativas locales de cada uno de los países de origen de estas. Otra posible razón puede ser que las bases de datos se encuentran limitadas en cuanto a su extensión, cabe recordar que se empleó la licencia educacional de GaBi y que, si bien OpenLCA, tiene acceso a varias bases de datos hay algunas que siguen siendo de paga; por su parte puede que falte información concerniente a los procesos en México para realizar ACV de forma más rigurosa, de igual forma se utilizó SimaPro 7, y si bien cumple con su función es cierto que ya se encuentran versiones más actuales en el mercado.

En cuanto a los resultados como tal, se puede decir que, de acuerdo con la magnitud de los valores, la ecotoxicidad de agua marina es la categoría de mayor interés en la obtención de agua destilada, seguida del potencial de calentamiento global y toxicidad humana; mientras que el potencial de acidificación y el potencial de eutrofización muestran valores que, en comparación, se podrían considerar despreciables.

De esta forma se puede argumentar que el verdadero problema de la producción de agua destilada en el LIQ no está enfocado en la quema de combustibles fósiles; si bien, una sugerencia sería revisar la eficiencia de la caldera y corroborar una pérdida mínima de calor a lo largo del proceso, el problema más importante es la inmensa cantidad de agua de enfriamiento desechada. Desde la toma de mediciones se sabe que el proceso desecha 5,700 litros de agua por hora, cuya única función en el proceso es condensar agua destilada, por lo que, en sí es agua de pozo calentada que irá a tratamiento, algo innecesario y que puede considerarse como desperdicio. Sin mencionar que la temperatura es de 57 °C, lo cual es superior al límite permisible de 40 °C para las descargas a los sistemas de alcantarillado urbano (SEMARNAT, 1998).

Cabe señalar que durante el recorrido del proceso se comentó la existencia de una cisterna para el almacenamiento del agua de enfriamiento para su posterior recirculación, y de una torre de enfriamiento; lamentablemente ninguna de las dos está operativa, ya sea por cuestiones de mantenimiento o de diseño.

En cualquier caso, las sugerencias principales para la mejora del proceso serían la revisión de estos equipos, determinar si son funcionales o requieren de mantenimiento y ponerlos en operación.

## CONCLUSIONES

- Se logró realizar el análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso de producción de agua destilada que se realiza actualmente en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Química de la UNAM.
- El Análisis de Ciclo de Vida de la producción de agua destilada en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM, mostró que:
  - de las categorías de impacto ambiental evaluadas las más relevantes del proceso son, respectivamente, el potencial de ecotoxicidad de agua marina, el potencial de calentamiento global y el potencial de toxicidad humana.
  - los resultados obtenidos para el potencial de acidificación y potencial de eutrofización son mucho menores.
  - si bien la etapa que más recursos energéticos requiere es la generación de vapor en la caldera, la etapa con el mayor resultado de impacto ambiental es la condensación de agua destilada. Además de que en esta etapa se desechan 5700 litros de agua por hora y su temperatura de descarga de 57 °C no cumple con la normativa mexicana.
- Si bien los programas especializados en la evaluación de impacto ambiental son una excelente herramienta de apoyo, éstos tienen limitantes que provocan una variación en los resultados, principalmente el que sus bases de datos están enfocadas a zonas geográficas específicas, y las diferencias entre las bases de datos y métodos de cálculo disponibles de programa a programa.
- El desarrollo de un ACV puede representar un consumo elevado de recursos y tiempo. Así mismo, la obtención de información puede ser problemática y la disponibilidad de datos puede impactar de forma importante la precisión de los resultados finales.
- Un ACV puede ayudar a tomadores de decisiones a seleccionar los productos y procesos que generen menores impactos al ambiente.

## REFERENCIAS

- Brauch, H. G., 2016. Historical Times and Turning Points in a Turbulent Century: 1914, 1945, 1989 and 2014?. *Addressing Global Environmental Challenges from a Peace Ecology Perspective*. Mosbach, Germany: Springer International Publishing, 11-54.
- Cárdenas L., D. & Romero M., I. (2019) *Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) de la disposición final de mercurio de termómetros clínicos*, [Tesis de licenciatura, UNAM] Tesis UNAM [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/HC13VI4QS5FAFV5VJ4HT66Q7LQY6CFBCA/NDMYGGF7BETLCRJMX-42409?func=full-set-set&set\\_number=478832&set\\_entry=000002&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/HC13VI4QS5FAFV5VJ4HT66Q7LQY6CFBCA/NDMYGGF7BETLCRJMX-42409?func=full-set-set&set_number=478832&set_entry=000002&format=999)
- Curran, M. A., 2006. *Life Cycle Assessment: Principles and Practise*, Cincinnati, United States of America: United States Environmental Protection Agency (EPA).
- Daily, G. & Ehrlich, P., 1992. Population, sustainability, and earth's carrying capacity: A framework for estimating population sizes and lifestyles that could be sustained without undermining future generations. *Bioscience*, 42(10), 761-771.
- Dubber, D., & Gray, N. F. (2010). Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45(12), 1595-1600. doi: 10.1080/10934529.2010.506116
- Facultad de Química (s.f.) *Presentación*. [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://quimica.unam.mx/ensenanza/licenciaturas/presentacion/>
- Facultad de Química. (2019) *La UNAM, en el lugar 81 en Ingeniería Química del QS World University Rankings 2019*. [fecha de Consulta 7 de Mayo de 2023]. Recuperado de: <https://quimica.unam.mx/la-unam-en-el-lugar-81-en-ingenieria-quimica-del-qs-world-university-rankings-2019/>
- Facultad de Química. (s.f.a) *Departamento de Ingeniería Química*. [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://quimica.unam.mx/la-facultad/organizacion/departamentos-academicos/ingenieria-quimica/#docencia-en-licenciatura-ig>
- Goga, T. (2016) *A comparative life cycle assessment of water treatment plants using alternative sources of water*. [Tesis maestría, University of KwaZulu-Natal] <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/14701>
- Grupo INFRA. (2018) *Hoja de Dato de Seguridad. HDS Propano (Gas licuado)*. [fecha de Consulta 23 de Enero de 2023]. Recuperado de: [https://grupoinfra.com/librerias/descargas/HDS%2020%2001%20PROPANO%20\(GAS%20LICUADO\)%20REV.%202.pdf](https://grupoinfra.com/librerias/descargas/HDS%2020%2001%20PROPANO%20(GAS%20LICUADO)%20REV.%202.pdf)
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011) *Life Cycle Assessment: Past, Present, and*

- Future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90-96. doi: 10.1021/es101316v
- Guinée, J.B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., Van Oers, L., Sleeswijk, A.W., Sangwon, S., Udo de Haes, H.A., (2002), *Handbook on Life-cycle Assessment. Operational Guide to the Iso Standards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
  - Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., De Goede, H. P., (1992). Evaluación del ciclo de vida Ambiental de los productos: guía y antecedentes (parte 1).
  - ISO, 2006. *ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*, Geneva, Switzerland; International Organisation for Standardisation.
  - McCabe, W. L.; (2007) *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ed. McGraw-Hill. México.
  - Naciones Unidas, Asamblea General. (1987) Desarrollo y Cooperación Económica Internacional: Medio Ambiente. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. [fecha de Consulta 15 de Febrero de 2023]. Recuperado de: [https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/C\\_MMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/C_MMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
  - Patronato de la Facultad de Química (s.f.) Facultad de Química Hoy. [fecha de Consulta 7 de Mayo de 2023]. Recuperado de: <https://patronatofq.org.mx/facultad-de-quimica-hoy/>
  - Raluy, R. G., Serra, L., & Uche, J. (2004) Life Cycle Assessment of Water Production Technologies – Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(4), 285-293. doi: 10.1065/lca2004.09.179.1
  - Ramírez, Y., & Ramón, V. (20 de mayo de 2020) Dona la FQ 100 galones de gel antiséptico a la Cruz Roja. Facultad de Química. [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://quimica.unam.mx/dona-la-fq-100-galones-de-gel-antiseptico-a-la-cruz-roja/>
  - Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13 (4), 290-300.
  - Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., (2004). Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* 30 (5), 701-720.
  - Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2000) *Análisis de agua – Determinación de la conductividad electrolítica – Método de prueba*. (NMX-AA-093-SCFI-2000) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>

- Secretaría de Economía (2001) *Análisis de agua – Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. (NMX-AA-072-SCFI-2001) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía (2001) *Análisis de aguas – Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. (NMX-AA-079-SCFI-2001) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía (2011) *Análisis de agua – Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba – Parte 2 -Determinación del índice de la demanda química de oxígeno – método de tubo sellado a pequeña escala*. (NMX-AA-030/2-SCFI-2011) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
- Secretaría de Economía (2010) *Protección al ambiente – Calidad del agua – Vocabulario – Parte 1*. (NMX-AA-089/1-SCFI-2010) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166799/NMX-AA-089-1-SCFI-2010.pdf>
- Secretaría de Economía. (2010) *Protección al ambiente – Calidad del agua – Vocabulario – Parte 2*. (NMX-AA-089/2-SCFI-2010) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166801/NMX-AA-089-2-SCFI-2010.pdf>
- Secretaría de Economía. (2016) *Análisis de agua. – Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. – Método de prueba*. (NMX-AA-008-SCFI-2016) [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f) *Fuentes de Área, Quema de combustibles*. [fecha de Consulta 21 de Enero de 2023]. Recuperado de: <http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/aire/inem/1..Quema.de.combustibles.pdf>
- Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998) *Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996*. [fecha de Consulta 7 de Mayo de 2023]. Recuperado de: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0)

- Secretaría de Salud, Comisión Permanente de la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. (2021) *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos 13.0*. (13a ed., Tomo 1)
- Valdivia-Medina, R. Y., Pedro-Valdés, S., & Laurel-Gómez, M. (2010). AGUA PARA USO EN LABORATORIOS. *Boletín Científico Técnico INIMET*, (1),3-10. [fecha de Consulta 23 de Enero de 2023]. ISSN: 0138-8576. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223017807002>
- Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P. & Marechal, F., (2008) *LCA tool for the environmental evaluation of potable water production*. *Desalination* 220, 37-56. doi:10.1016/j.desal.2007.01.021
- Yu, Z., Ma, H., Liu, X., Wang, M., Wang, J. (2022) Review in life cycle assessment of biomass conversion through pyrolysis-issues and recommendations. *Green Chemical Engineering*, 3(4), 304-312. doi: 10.1016/j.gce.2022.08.002
- Zhou, J., Chang, V. W. C., & Fane, A. G. (2014). Life Cycle Assessment for desalination: A review no methodology feasibility and reliability. *Water Research*, 61, 210-223. doi: 10.1016/j.watres.2014.05.017