



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
(ENERGÍA) – (ECONOMÍA DE LA ENERGÍA)

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS  
IMPACTOS CON ENFOQUE EN LA CALIDAD DEL AGUA DE PLANTAS  
GENERADORAS DE ELECTRICIDAD**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**CATALINA FERAT TOSCANO**

TUTOR PRINCIPAL  
**CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ**  
FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR  
Juan Luis François Lacouture, Facultad De Ingeniería  
Gabriel León De Los Santos, Facultad De Ingeniería  
Gabriela Eleonora Moeller Chávez, Universidad Politécnica Del Estado De Morelos  
Daniel Alfredo Revollo Fernández, Universidad Autónoma Metropolitana-Azc.

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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: Dr. Juan Luis François Lacouture  
Secretario: Dr. Gabriel León De Los Santos  
1<sup>er</sup> Vocal: Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez  
2<sup>do</sup> Vocal: Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez  
3<sup>er</sup> Vocal: Dr. Daniel A. Revollo Fernández

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez

-----  
**FIRMA**

---

## *Agradecimientos*

*A los miembros de mi jurado, Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez, Dr. Gabriel León de los Santos, Dr. Juan Luis François Lacouture y Dr. Daniel Alfredo Revollo Fernández, les agradezco a cada uno de ustedes sus valiosos comentarios y retroalimentación recibida, semestre con semestre, que hicieron posible llevar a buen término esta investigación.*

*De forma especial, agradezco a la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez por ser mi tutora y darme la oportunidad de trabajar bajo su dirección. Muchas gracias por su paciencia, buena disposición y constante dedicación al orientarme y proporcionarme las herramientas necesarias para conformar y alcanzar los objetivos de esta investigación.*

*A mis compañeros de trabajo, les agradezco el interés y apoyo que me brindaron durante el desarrollo de este estudio. En especial, gracias al Dr. Ociel Flores Díaz y al Dr. Jorge Carrera Bolaños por sus valiosas aportaciones y pertinentes observaciones.*

*A mis queridos amigos, que supieron esperarme todo este tiempo, mil gracias por sus palabras de aliento y ánimo. En especial, quiero agradecer al C.P. y M.I. Luis Nieto Carbajal por sus continuas muestras de apoyo y palabras de motivación durante el desarrollo de este proyecto.*

*A mi maestra y amiga Beatriz Flores Gheno, gracias por el apoyo brindado en la última fase de este trabajo de investigación.*

*Al personal de la Comisión Federal de Electricidad, agradezco su valiosa ayuda al otorgarme las facilidades y la información necesaria para la realización de este estudio.*

*Y, por supuesto, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado y superarme profesionalmente.*

---

## *Dedicatoria*

*A mis padres (q. e. p. d.), Ingeniero Ricardo L. Ferat Palencia y Técnica Anestésista Beatriz Toscano Zárate, gracias por acompañarme durante todo este tiempo. Doquiera que se encuentren, tengo la confianza de que estarán satisfechos al ver concluida mi investigación.*

*A mis hermanos y hermanas:*

*Ricardo, Jorge, María del Carmen, Beatriz, Pedro y Eduardo —a quienes les debo muchos momentos de estar juntos—, gracias por formar parte de mi vida. Y en especial a Margarita, quien siempre ha sido un ejemplo de perseverancia, mil gracias, hermana, por tu apoyo y compañía.*

*En especial,*

*Al Doctor Héctor Manuel Bravo Pérez (q. e. p. d.), profesor y estimado amigo, quien me contagió su pasión y entusiasmo por la economía del agua.*

---

## Tabla de contenido

Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tablas.....	xi
Lista de Siglas.....	xiii
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvi
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes de la investigación.....	1
1.1.1 Vínculo agua-energía.....	1
1.1.2 Sistema eléctrico y recurso hídrico en México.....	2
1.1.3 Evaluación del impacto ambiental a través del análisis de ciclo de vida.....	2
1.1.4 Problemática.....	3
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos generales y específicos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación de la propuesta.....	4
1.5 Estructura de la tesis.....	5
2 Marco teórico.....	6
2.1 Sistema eléctrico mexicano.....	6
2.1.1 Generación de energía eléctrica.....	6
2.1.2 Tecnologías de generación de energía eléctrica en México.....	6
2.2 Centrales termoeléctricas.....	8
2.2.1 Central termoeléctrica convencional (o de vapor).....	8
2.2.2 Turbina de gas.....	10
2.2.3 Centrales de ciclo combinado.....	11
2.2.4 Carboeléctricas.....	12
2.3 Calidad del agua en las centrales termoeléctricas.....	13
2.3.1 Calidad del agua en la caldera.....	15
2.3.2 Calidad del agua en el sistema de enfriamiento.....	17

---

2.4	Operación y mantenimiento en las centrales termoeléctricas .....	19
2.4.1	Composición del gas natural.....	20
2.5	Impacto ambiental.....	21
2.5.1	Impactos ambientales relevantes por tecnología.....	21
2.6	Análisis de Ciclo de Vida .....	23
2.6.1	Definición de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) .....	23
2.6.2	Etapas de la metodología del ACV.....	24
2.6.3	Métodos utilizados para evaluar los impactos .....	25
2.7	Herramientas informáticas .....	28
2.8	Estado del arte: aplicación del ACV en plantas termoeléctricas .....	30
3	Estructura de las plantas de ciclo combinado .....	32
3.1	Descripción de los componentes principales y su función .....	32
3.1.1	Turbina de gas.....	32
3.1.2	La caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG).....	32
3.1.3	Turbina de vapor .....	33
3.1.4	Condensador .....	33
3.1.5	Generador.....	33
3.1.6	Sistema de enfriamiento principal .....	33
3.1.7	Estación de regulación y medida (ERM) .....	35
3.1.8	Planta de tratamiento de agua .....	35
3.2	Sistemas de alimentación de agua en la planta de ciclo combinado.....	39
3.2.1	Ciclo agua-vapor (ciclo vapor principal) .....	39
3.2.2	Sistema de agua de enfriamiento .....	39
3.2.3	Sistema de humidificación de aire en compresor y/o cámara de combustión .....	39
3.2.4	Calidad del agua en los sistemas de alimentación .....	40
4	Metodología ACV.....	41
4.1	Objetivo y alcance del estudio .....	41
4.1.1	Descripción del sistema .....	41
4.1.2	Límites del sistema .....	41
4.2	Análisis de inventario .....	42
4.2.1	Condiciones de operación de la planta de ciclo combinado .....	42
4.2.2	Identificación de entradas y salidas de los materiales del inventario .....	43
4.2.3	Diagrama de bloques del proceso de GEE en la unidad de CC .....	48

---

4.2.4	Recopilación de información y tratamiento de datos faltantes .....	49
4.2.5	Consideraciones generales .....	49
4.2.6	Consideraciones específicas.....	50
4.2.7	Cálculo de la cantidad de combustible.....	52
4.2.8	Supuestos .....	53
4.3	Evaluación del impacto.....	53
5	Impactos ambientales determinados .....	54
5.1	Consumo de combustible y emisiones a la atmósfera .....	54
5.1.1	Gases efecto invernadero (GEI).....	55
5.2	Consumo y calidad de agua .....	58
5.2.1	Consumo de agua.....	58
5.2.2	Estudios de calidad de agua de la unidad de CC .....	60
5.3	Compuestos químicos y toxicidad .....	64
5.3.1	Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos químicos utilizados en el tratamiento interno del CAV .....	65
5.3.2	Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos químicos utilizados en el sistema de enfriamiento .....	69
5.3.3	Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos utilizados en el tratamiento de agua desmineralizada .....	73
5.4	Impacto por la presencia de sales en las descargas.....	75
5.4.1	Calidad del agua de la descarga en una termoeléctrica convencional .....	76
5.4.2	Problemas potenciales por la salinización .....	79
6	Propuesta de una guía metodológica.....	83
6.1	¿En dónde puedo aplicar esta guía? .....	83
6.2	¿Qué consideraciones se deben tomar en cuenta para determinar los impactos bajo la óptica del ACV?.....	83
6.2.1	Para empezar.....	83
6.2.2	Identifica el tipo de tecnología empleada .....	83
6.2.3	Un poco de ayuda... (diagrama de bloques).....	84
6.2.4	¿Qué debo considerar para el análisis del inventario (etapa 2)?.....	85
6.2.5	Lo que hay que tomar en cuenta respecto al agua y al combustible.....	86
6.2.6	¿Qué otra información necesito para completar el inventario? .....	87
6.2.7	Ahora es tiempo de evaluar.....	89
6.2.8	Y, por último, es hora de interpretar... ..	90

---

7	Conclusiones .....	91
	Referencias.....	94
	Anexo A – Parámetros de medición de la calidad del agua en las centrales termoeléctricas.....	110
	Anexo B – Metodología para la evaluación del impacto del ciclo de vida.....	113
	Anexo C – Balance de masa y energía.....	118
	Anexo D – Características, toxicidad e impacto de los compuestos químicos.....	123
	Anexo E – Entradas y salidas del inventario .....	142

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Generación bruta de energía eléctrica en México en 2017, clasificada por tecnología. ....	7
Figura 2.2. Diagrama de una central termoeléctrica convencional .....	9
Figura 2.3. Diagrama de una central turbogás de ciclo abierto .....	10
Figura 2.4. Diagrama de una central de ciclo combinado .....	11
Figura 2.5. Diagrama de una termoeléctrica convencional a base de carbón .....	13
Figura 2.6. Afectaciones al ambiente y a la salud humana ocasionadas por el cambio climático.....	21
Figura 2.7. Principales impactos ambientales asociados a los recursos energéticos empleados para generar energía eléctrica. ....	22
Figura 2.8. Esquema del ciclo de vida de la cuna a la tumba de un producto o servicio .....	24
Figura 2.9. Etapas del ACV. ISO 14040:2006 .....	25
Figura 2.10. Relación entre los resultados del inventario, los indicadores de punto medio y los indicadores de punto final del método ReCiPe 2008.....	27
Figura 3.1. Proceso de desmineralización. ....	37
Figura 3.2. Proceso de ósmosis inversa .....	38
Figura 4.1. Entradas/salidas principales y secundarias de la unidad de ciclo combinado.....	44
Figura 4.2. Entradas/Salidas de la turbina de gas .....	44
Figura 4.3. Entradas/salidas de la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG).....	45
Figura 4.4. Entradas/salidas de la turbina de vapor. ....	45
Figura 4.5. Entradas/salidas del condensador.....	45
Figura 4.6. Entradas/salidas del tanque de alimentación.....	46
Figura 4.7. Entradas/salidas del generador eléctrico .....	46
Figura 4.8. Entradas/salidas de la torre de enfriamiento .....	46
Figura 4.9. Entradas/salidas de la estación de regulación y medida (ERM) .....	47
Figura 4.10. Entradas/salidas del tratamiento mediante intercambio iónico. ....	47
Figura 4.11. Entradas/salidas del tratamiento mediante ósmosis inversa.....	48
Figura 4.12. Diagrama de bloques del proceso de generación de energía eléctrica de la planta de CC.....	48
Figura 5.1. Asignación de agua y usos en la unidad de estudio. ....	59
Figura 5.2. Conductividad eléctrica del agua medida durante el año de puesta en marcha de la unidad de ciclo combinado. ....	63

Figura 5.3. Consumo de compuestos químicos empleados en el CAV de la unidad de estudio en el mes de diciembre de 2014.....	67
Figura 5.4. Consumo de compuestos químicos empleados en el CAV, de enero de 2010 a octubre de 2015. ....	68
Figura 5.5. Consumo de compuestos químicos empleados en el sistema de enfriamiento en el mes de diciembre de 2014. ....	71
Figura 5.6. Consumo de compuestos químicos empleados en el sistema de enfriamiento, de enero 2010 a octubre de 2015.....	72
Figura 5.7. Consumo de compuestos químicos empleados en el tratamiento de agua DM en el mes de diciembre de 2014.....	73
Figura 5.8 Consumo de compuestos químicos en el tratamiento de agua DM, de enero 2010 a octubre de 2015. ....	74
Figura 6.1 Diagrama de bloques general que representa una unidad turbogás, una planta convencional y los sistemas auxiliares.....	85
Figura B.1 Esquema de clasificación y caracterización para la categoría Acidificación. ...	115
Figura C.1. Planta de ciclo combinado: detalle de consumo de agua y auxiliares. ....	118
Figura E.1. Diagrama de bloques general asociado a las entradas y salidas del inventario. ....	142

## Índice de Tablas

Tabla 2.1	Clasificación de las centrales generadoras de acuerdo con el tipo de demanda que satisfacen .....	7
Tabla 2.2	Características de las perspectivas utilizadas en el método ReCiPe.....	28
Tabla 2.3	Cuadro comparativo de las herramientas informáticas para ACV más populares. ....	29
Tabla 4.1	Características de operación de la planta de CC.....	42
Tabla 4.2	Composición del gas natural.....	43
Tabla 5.1	Resultados del cálculo de la cantidad de combustible y emisiones producidas por la combustión: valores teóricos y reales .....	55
Tabla 5.2	Estudio de caracterización de la muestra de agua de pozo y descarga de la planta, realizado en abril de 2014. ....	61
Tabla 5.3	Tipos de ensayos de toxicidad para químicos empleados en el tratamiento de agua.....	65
Tabla 5.4	Estudio de calidad del agua de una termoeléctrica convencional .....	77
Tabla 5.5	Riesgo de salinidad relacionado con los SDT y la conductividad eléctrica del agua.....	80
Tabla 5.6	Correspondencia entre concentración de sulfato y conductividad eléctrica y efectos asociados .....	81
Tabla 6.1	Impactos por tipo de combustible.....	88
Tabla 6.2	Impactos del sistema de enfriamiento .....	89
Tabla 6.3	Impactos comunes a todas las centrales .....	89
Tabla A.1	Parámetros de medición en el CAV en diferentes puntos de control. ....	110
Tabla A.2	Parámetros de control en las aguas de enfriamiento.....	111
Tabla B.1	Algunos conjuntos de normalización disponibles.....	117
Tabla D.1	Características, toxicidad e impacto del sulfato de sodio. ....	125
Tabla D.2	Características, toxicidad e impacto de la sosa cáustica.....	126
Tabla D.3	Características, toxicidad e impacto del ácido sulfúrico. ....	127
Tabla D.4	Características, toxicidad e impacto del biocida oxidante.....	128
Tabla D.5	Características, toxicidad e impacto del inhibidor para la corrosión e incrustaciones de cobre.....	129
Tabla D.6	Características, toxicidad e impacto del inhibidor para la corrosión e incrustaciones de acero. ....	130
Tabla D.7	Características, toxicidad e impacto del biodispersante. ....	131
Tabla D.8	Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo I.....	132

Tabla D.9	Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo I.....	133
Tabla D.10	Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo II.....	135
Tabla D.11	Características, toxicidad e impacto del fosfato trisódico. ....	136
Tabla D.12	Características, toxicidad e impacto del fosfato disódico anhidro. ....	137
Tabla D.13	Características, toxicidad e impacto de la ciclohexilamina. ....	138
Tabla D.14	Características, toxicidad e impacto de la hidracina.....	139
Tabla D.15	Características, toxicidad e impacto de la solución de fosfonatos.....	140
Tabla E.1	Entradas y salidas del inventario asociadas al diagrama de bloques .....	142

## Lista de Siglas

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ACV	Análisis de ciclo de vida
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
BCF	Factor de bioconcentración
CAV	Ciclo agua-vapor
CC	Ciclo combinado
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CCT	Centro Científico Tecnológico
CCVC	Forzadores climáticos de vida corta
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CNA	Comisión Nacional del Agua
COC	Ciclos de concentración
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DM	Desmineralizada
EC <sub>50</sub>	Concentración efectiva media
EIA	United States Energy Information Administration
EICV	Evaluación del impacto del ciclo de vida
EPA	United States Environmental Protection Agency
EPRI	Electric Power Research Institute
ERM	Estación de regulación y medida
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEE	Generación de energía eléctrica
GEI	Gases de efecto invernadero
GNL	Gas natural licuado
HFC	Hidrofluorocarbonos
HHV	Higher heating value (poder calorífico superior)
HRSG	Heat Recovery Steam Generator (caldera recuperadora de calor-generadora de vapor)
ICSCs	International Chemical Safety Cards
IE	Instituto de Ecología
IEA	International Energy Agency
II	Intercambio iónico
ILO	International Labour Organization
IMNC	Instituto Mexicano de Normalización y Certificación
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Estandarización)
JRC-IES	European Commission Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability
Koc	Coefficiente de carbono orgánico

LC <sub>50</sub>	Concentración letal media
LD <sub>50</sub>	Dosis letal media
LHV	Lower heating value (poder calorífico inferior)
LOEC	Concentración de efectos mínimos observables
MSPS	Ministerio de Sanidad y Política Social
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NOEC	Concentración de efecto no observado
OI	Ósmosis inversa
PFC	Perfluorocarbonos
RHIR	Recursos hídricos internos renovables
RIVM	Instituto Holandés de Salud Pública
SAC	Resina catiónica de ácido fuerte
SBA	Resina aniónica de base fuerte
SDT	Sólidos disueltos totales
SE	Secretaría de Economía
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SNMPE	Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía
SST	Sólidos disueltos totales
TLV	Valor límite umbral (Threshold Limit Value)
TWA	Promedio ponderado en el tiempo (Time-weighted average)

## Resumen

Todas las tecnologías de generación de energía eléctrica emplean agua a lo largo de su ciclo de vida. La cantidad de agua requerida no solo depende de la tecnología empleada, sino también de la disponibilidad y de la ubicación del recurso.

La creciente demanda de agua, para satisfacer las necesidades de la población y de la industria, la ha convertido en un recurso escaso, y su calidad se ha visto afectada por las actividades antropogénicas.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que ha sido empleada para evaluar los impactos ambientales de muchos procesos, incluido la generación de energía de las plantas termoeléctricas. La mayoría de estos estudios se han enfocado en los impactos derivados de los combustibles fósiles y conceden poca o nula importancia al consumo de agua y a los efectos de los compuestos químicos empleados para su acondicionamiento. Por esta razón, en esta investigación se consideran estos aspectos en la determinación de los impactos ambientales potenciales de una planta de ciclo combinado.

El estudio se realizó aplicando la metodología de ACV y evaluando los impactos con el método ReCiPe, en sus 18 categorías de punto medio, por medio de la herramienta informática SimaPro. El proceso de generación de energía se dividió en subprocesos, los cuales fueron analizados de manera individual. Además, se propuso un diagrama de bloques para identificar las entradas (materia prima y energía) y salidas (productos, subproductos, emisiones, descargas y desechos) de cada subproceso.

Los resultados mostraron que el sistema de enfriamiento y el proceso de ósmosis inversa son los que mayormente afectan a la categoría de agotamiento de agua. En el ciclo agua-vapor, los compuestos inorgánicos contribuyen a las categorías de impacto por su producción y toxicidad, siendo la hidracina el compuesto con mayor contribución en todas las categorías. En el sistema de enfriamiento, los compuestos orgánicos contribuyen, en mayor medida, por su producción. Se desconoce en qué cantidad y de qué forma los compuestos químicos llegan a los cuerpos receptores después de ser descargados con las aguas residuales. Los compuestos químicos empleados no se encuentran referidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, y los de naturaleza orgánica podrían ser considerados como contaminantes emergentes.

Los estudios de toxicidad revelan que gran parte de estos compuestos orgánicos afectan a distintas especies de diferentes niveles tróficos, siendo *Daphnia magna* la especie más sensible a muy bajas concentraciones. Por otro lado, la cantidad de sales que se generan durante el proceso puede contribuir a la salinidad del cuerpo receptor. El uso de esta agua para riego puede ocasionar salinización de suelos, afectando la producción de los cultivos.

Los impactos detectados pueden servir de base para establecer límites de afectación al ser humano y a los ecosistemas y, con ello, determinar el costo de las externalidades, que se podría adicionar al costo de la generación de energía eléctrica.

Se propone una guía metodológica como apoyo para determinar los impactos ambientales potenciales ocasionados por plantas termoeléctricas, desde la perspectiva del ACV. Esta guía puede ser utilizada en plantas termoeléctricas que presenten una estructura similar a la de la planta en estudio.

## Abstract

All power generation technologies use water throughout their life cycle. The amount of water required depends not only on the technology used but also on the availability and location of water sources.

As a result of the growing water demand to meet population and industry needs, this resource has become scarce. Furthermore, its quality has been affected by anthropogenic activities.

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool used to assess the environmental impacts of many processes, including thermoelectric power generation. Most LCA studies on power generation have focused on the effects of fossil fuels and give little or no importance to water consumption and the health and environmental risks arising from the chemicals used for water conditioning.

For this reason, this research project considers these aspects in determining the potential environmental impacts of a combined-cycle gas turbine (CCGT) plant. The study was carried out by applying the LCA methodology with the ReCiPe method, which enabled us to assess 18 impact categories at the midpoint level. The analysis was performed with the SimaPro software.

The power generation process was divided into subprocesses, which were analyzed individually. A block diagram was also proposed as an aid for identifying the inputs (raw materials and energy) and outputs (products, by-products, emissions, discharges, and waste) of each subprocess.

The results showed that the cooling system and the reverse osmosis process are the subprocesses with the highest impact on the water depletion category.

In the water-steam cycle, inorganic compounds contribute to the impact categories due to their toxicity and production process, with hydrazine being the inorganic compound that had the highest contribution to all the categories.

In the cooling system, the contribution of organic compounds is due, to a greater extent, to their production process. It is unknown to what extent and in which way chemical compounds reach the receiving body of water after being discharged with the wastewater. The Mexican Official Norm NOM-001-SEMARNAT-1996 does not mention the maximum permissible limits of the chemicals used, and those of an organic nature could be considered emerging pollutants.

Toxicity studies reveal that most of these organic compounds affect different species at different trophic levels, with *Daphnia magna* being the most susceptible species at very low concentrations. On the other hand, the amount of salts generated during the process can contribute to the salinity of the receiving body of water. The use of this water for irrigation can cause soil salinization, affecting crop production.

The impacts detected can serve as a basis for establishing federal limits on the permissible levels of pollutants discharged in wastewater to preserve public health and ecosystems. With this information, external costs can be determined and then added to the total cost of power generation.

A methodological guide is proposed to determine the potential environmental impacts caused by thermoelectric power plants from an LCA perspective. This guide can also be used for thermoelectric power plants with a structure similar to that of the power plant under study.

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes de la investigación

### 1.1.1 Vínculo agua–energía

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2014), en su *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014*, resalta la importancia del estrecho vínculo entre el agua y la energía, debido a que constituyen el núcleo del desarrollo sostenible.

Ya en el 2012, la publicación *World Energy Outlook* había puesto de manifiesto la importancia de esta relación al señalar que «el agua es necesaria para la energía y la energía es necesaria para producir y suministrar agua». Por primera vez se incluían datos sobre esta mutua dependencia al comparar los volúmenes de agua suministrados con los requeridos para producir energía (International Energy Agency [IEA], 2012).

Todas las tecnologías de generación de energía eléctrica utilizan agua a lo largo de su ciclo de vida (Meldrum, Nettles-Anderson, Heath & Macknick, 2013). La cantidad de agua necesaria para la generación de energía no solo depende de la tecnología empleada, sino también de la disponibilidad y la localización del recurso hídrico.

Las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles o las que producen reacciones nucleares requieren aproximadamente de 560 mil millones de litros de agua por día para la generación de electricidad y para mantener su eficiencia (Honeywell, 2012).

Para 2035 se pronostica que las necesidades de agua para la producción de energía crecerán dos veces más rápido que la demanda de energía, lo que refleja una tendencia hacia una generación de electricidad con un uso más intensivo de agua y un aumento en la producción de biocombustibles (IEA, 2012). Debido a esto, el sector energético podría verse limitado directamente por el agua requerida para las operaciones e indirectamente por el agua necesaria para la cadena de suministro del combustible y los ciclos de vida de los equipos. Esta limitante afectaría fuertemente la demanda global de electricidad por actividades humanas (Electric Power Research Institute [EPRI], 2002).

Por otro lado, a lo largo del proceso de generación de energía se utilizan compuestos químicos, cuyos residuos, contenidos en las aguas residuales que se generan, tienen graves repercusiones en los ecosistemas acuáticos.

En Estados Unidos, las descargas de las plantas termoeléctricas convencionales en aguas superficiales contienen grandes cantidades de contaminantes tóxicos —como arsénico, plomo, mercurio, selenio, cromo y cadmio—, muchos de los cuales permanecen en el medio ambiente durante años. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) promulgó en 2015 una norma final que establece los límites federales de los niveles de metales tóxicos en aguas residuales que pueden ser descargados de las centrales eléctricas a fin de proteger la salud pública y el medio ambiente (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2015).

### **1.1.2 Sistema eléctrico y recurso hídrico en México**

La energía eléctrica en nuestro país se produce a través de distintas tecnologías — hidroeléctrica, termoeléctrica, eólica, fotovoltaica, geotérmica y nuclear. La selección de la tecnología depende del costo de generación eléctrica, la disponibilidad del combustible, las cargas por abastecer, la situación geográfica, los recursos naturales y las características de la demanda.

En México, el sistema eléctrico debe tener suficientes unidades generadoras disponibles para cubrir la demanda eléctrica, las variaciones en la demanda y el servicio de respaldo para dar confiabilidad y seguridad a la operación de las redes generales de transmisión y distribución. Las unidades más eficientes, diseñadas para operar largos períodos de tiempo, funcionarán todo el año (carga base); otras solo actúan como respaldo y su operación anual será muy reducida (carga intermedia y pico).

Las centrales generadoras que operan con base en el ciclo Rankine utilizan agua desmineralizada para el ciclo agua-vapor; algunas emplean agua tratada para el sistema de enfriamiento. El nivel de consumo o la alteración de la calidad del recurso hídrico depende del proceso de generación. Existen centrales en donde el consumo de agua es mínimo y se requiere únicamente para servicios internos; pero, en otros casos, es imprescindible para el proceso de generación, y su consumo es mayor. Debido al fuerte vínculo que existe entre el agua y la energía, es importante determinar cómo se ve afectada la calidad del recurso hídrico durante el proceso.

En México, en 2013, el total de las descargas de aguas residuales fue de 26,333 millones de m<sup>3</sup>, y solamente cerca del 20% recibieron algún tratamiento previo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014).

Por otro lado, se ha incrementado la sobreexplotación de acuíferos en las últimas décadas. De los 653 acuíferos existentes, para finales de 2015, 105 se encontraban sobreexplotados: 32 presentaban suelos salinos y aguas subterráneas salobres, y 18 se identificaron con intrusión marina (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018).

Además, en ese mismo año, la extracción hídrica total nacional para usos consuntivos alcanzó los 85,664 millones de m<sup>3</sup>; de éstos, 4,149 millones aproximadamente se destinaron para la generación de energía eléctrica. El 89% del agua provino de fuentes superficiales; el 11% restante, de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2018).

Aunque la extracción de agua a nivel nacional representa el 17% de los recursos hídricos internos renovables (RHIR), esta cifra no revela los problemas de escasez y contaminación que afectan a una porción importante de las cuencas y acuíferos nacionales, y que causan conflictos entre los usuarios (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2014).

### **1.1.3 Evaluación del impacto ambiental a través del análisis de ciclo de vida**

Una herramienta que ha sido utilizada para estudiar el impacto ambiental es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta metodología permite identificar y cuantificar la energía y los materiales utilizados, así como las salidas al ambiente, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de

un producto o servicio —desde la extracción de materias primas hasta el reciclaje y/o disposición final (Van Hoof, Monroy & Saer, 2008).

La aplicación de esta herramienta al proceso de generación de energía eléctrica permite identificar y determinar los impactos, tanto al ambiente como a la salud humana, causados por las emisiones al aire, descargas al agua y contaminación del suelo durante el ciclo de vida de una central eléctrica.

#### 1.1.4 Problemática

- Como resultado de las exigencias de la vida diaria de la población, hay una demanda creciente de energía que será necesario satisfacer a través de las diferentes tecnologías de generación.
- Este incremento en la demanda de energía implica un aumento en la demanda de agua para su producción, por lo que se requerirá de un mayor consumo de productos químicos para el acondicionamiento del agua.
- La mayoría de los estudios sobre los impactos al ambiente originados por la generación de energía eléctrica se han enfocado en los efectos de la combustión de combustibles fósiles.
- Puesto que la cantidad de combustible utilizado es mayor a la cantidad de agua empleada en el proceso, se le da poca importancia al consumo y a la contaminación del agua debida a los compuestos químicos empleados.

## 1.2 Hipótesis

El uso de compuestos químicos para el acondicionamiento del agua utilizada en la generación de energía eléctrica conlleva un impacto al ambiente. Sin embargo, se desconoce la magnitud de este impacto debido a que la mayoría de los estudios se enfocan en los efectos causados por la combustión de los materiales combustibles.

Si se utiliza la herramienta de ACV para identificar los impactos relacionados con el acondicionamiento del agua y posteriormente se investiga qué compuestos químicos son los más tóxicos para el medio acuático y para el ser humano, se podría determinar el nivel potencial de afectación que tiene su consumo.

Esta información contribuiría a establecer medidas dirigidas a reducir tales efectos mediante el uso de compuestos químicos menos dañinos y la aplicación de procesos de recuperación y reciclaje de sustancias.

## 1.3 Objetivos generales y específicos

### 1.3.1 Objetivo general

El objetivo de este estudio es determinar los impactos ambientales de una planta de ciclo combinado, con un enfoque en la calidad de agua y en los efectos que tienen los compuestos químicos empleados para su acondicionamiento.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Conocer el principio de funcionamiento de las plantas de generación de energía eléctrica de ciclo combinado.
- Establecer las etapas del proceso de generación y proponer un diagrama de bloques que las represente.
- Identificar y obtener la información referente a los insumos de entrada y salida en cada etapa del proceso.
- Aplicar el ACV y determinar la huella ambiental.
- Analizar los impactos relacionados con el consumo de agua y afectación al ser humano para determinar el nivel potencial de afectación por la toxicidad de los compuestos químicos empleados.
- Con base en el estudio realizado, proponer una guía metodológica que pueda aplicarse a las tecnologías convencional, turbogás y ciclo combinado.

## 1.4 Justificación de la propuesta

El crecimiento de la población, aunado con el aumento de la demanda de energía eléctrica, hace necesaria la instalación de nuevas centrales generadoras para satisfacer la demanda.

Los criterios de decisión para seleccionar el tipo de las nuevas plantas son la eficiencia y el costo más bajo de generación de energía; este costo debería considerar las externalidades<sup>1</sup> que se originan en su ciclo de vida, como se indica en el artículo 36 BIS de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (2012).

Dentro de las externalidades, el volumen de agua utilizado por el sistema de enfriamiento y la contaminación térmica son las que más se consideran; sin embargo, para la generación de energía, se requiere de compuestos químicos para el acondicionamiento del agua, cuyos impactos no se contemplan y, por ende, se desconoce la magnitud de su alcance.

En México, en el 2017, las plantas de ciclo combinado proporcionaron el 50.2% de la generación de energía bruta (Secretaría de Energía [SENER], 2018b). La flexibilidad operacional de esta tecnología, así como los bajos costos de generación, menores emisiones atmosféricas, ahorro de energía (García, Ratia & Perea, 2008), mayor eficiencia —cercana al 59% a plena carga—, un período de construcción relativamente corto y la posibilidad de poder ser instaladas por etapas —primero la turbina de gas y posteriormente la turbina de vapor (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2014) — han hecho que su uso sea ampliamente generalizado, propiciando la construcción de este tipo de plantas en México y en el mundo.

---

<sup>1</sup> Impactos sobre la sociedad o el medio ambiente que no están reflejados en el precio de mercado de la electricidad (Caldés, Lechón, de la Rúa & Herrera, 2017)

Por estas razones, se ha seleccionado esta tecnología para realizar un estudio de ACV orientado a la determinación de los posibles impactos ambientales relacionados con el uso de químicos para el acondicionamiento del agua que se utiliza durante el proceso de generación de energía eléctrica.

Una vez que se han identificado los impactos, estos valores podrían servir como marco de referencia para determinar el costo de las externalidades que se sumarían a los costos de la generación de energía.

## 1.5 Estructura de la tesis

Esta tesis consta de siete capítulos, estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presenta una introducción al trabajo de investigación, los objetivos y la justificación del estudio.

En el capítulo 2 se describen las consideraciones teóricas en las que se fundamenta este estudio: el sistema eléctrico mexicano, las características de las centrales termoeléctricas, los impactos ambientales y la metodología del ACV. El capítulo concluye con una síntesis del estado del arte sobre la aplicación de esta herramienta para evaluar los impactos de las plantas termoeléctricas.

En el capítulo 3 se explica con más detalle la estructura de las plantas de ciclo combinado y el tipo de sistemas de alimentación de agua que utilizan.

En el capítulo 4 se describe la aplicación de la metodología del ACV y se incluyen los criterios que se consideraron para la elaboración del inventario.

En el capítulo 5 se presentan los resultados del estudio; se hace un análisis de las emisiones al aire por el consumo del combustible y las descargas de la planta en estudio. Se comparan los resultados de calidad del agua entregados por la planta con los valores límite establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996; se analizan los impactos potenciales de los compuestos químicos empleados para el acondicionamiento del agua y que podrían estar presentes en la descarga; y se señalan los impactos potenciales causados por la salinidad de las aguas residuales.

En el capítulo 6 se propone una guía metodológica y se exponen las consideraciones que se deberán tomar en cuenta para determinar los impactos ambientales de las plantas termoeléctricas mediante la aplicación del ACV con un enfoque en la calidad de agua.

Por último, en el capítulo 7, se recogen las conclusiones de este estudio.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Sistema eléctrico mexicano

#### 2.1.1 Generación de energía eléctrica

En América del Norte, el sistema de energía eléctrica se compone generalmente de tres etapas: generación, transmisión y distribución.

El proceso de generación consiste en la producción de electricidad a partir de otros tipos de energía o de procesos que liberan energía. Por su parte, la transmisión es el proceso por el cual las centrales eléctricas conducen la energía eléctrica a las áreas de distribución. Finalmente, la distribución abarca el sistema local de líneas de transmisión de bajo voltaje, subestaciones y transformadores que son utilizados para llevar la electricidad a los consumidores finales (Comisión para la Cooperación Ambiental [CCA], 2011).

Para generar electricidad, las centrales emplean diversos combustibles tales como el carbón, gas natural, combustóleo y uranio, así como recursos de fuentes renovables —agua, sol, viento, energía geotérmica y biomasa. El tipo de combustible es uno de los factores que, junto con el costo de generación y la eficiencia de la planta generadora, determinan la forma de operación de las distintas plantas en un sistema (SENER, 2015).

#### 2.1.2 Tecnologías de generación de energía eléctrica en México

En México, la energía eléctrica se genera a través de diferentes tipos de tecnologías que dependen de la situación geográfica, los recursos naturales y las características de la demanda.

De acuerdo con la fuente de energía empleada, el *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018–2032* (SENER, 2018a) clasifica a las centrales generadoras en centrales eléctricas con tecnologías limpias y centrales eléctricas convencionales.

En el artículo 3, fracción XXII, de la Ley de la Industria Eléctrica (2014), las energías limpias están definidas como «las fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan».

Por otro lado, el grupo de tecnologías convencionales (o tecnologías térmicas convencionales) está integrado por todas aquellas unidades y centrales que usan combustibles fósiles como energético primario para generar energía eléctrica y no cuentan con un equipo de captura y confinamiento de CO<sub>2</sub>. A este grupo pertenecen las siguientes tecnologías: termoeléctrica convencional (o vapor), turbogás, combustión interna, ciclo combinado, carboeléctrica y lecho fluidizado (SENER, 2018a).

Dependiendo de la demanda que pueden cubrir, las centrales generadoras se clasifican en tres grupos: centrales de carga pico o punta, intermedia y base (CFE, 2015). La Tabla 2.1 muestra las características de estos grupos.

Tabla 2.1  
Clasificación de las centrales generadoras de acuerdo con el tipo de demanda que satisfacen

Carga	Tipo de tecnología	Características	Operación	Costo	Uso
Pico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Turbina de gas</li> <li>Motor de combustión interna de almacenamiento por bombeo</li> <li>Hidroeléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algunas son móviles de</li> <li>Facilidad de arranque</li> </ul>	Varias veces al día	Bajo costo de inversión y alto de generación	Respaldo o emergencia
Intermedia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central de vapor de bajo rendimiento</li> <li>Ciclo combinado de bajo rendimiento</li> <li>Hidroeléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor eficiencia que las de carga pico</li> <li>Menor eficiencia que las de carga base</li> </ul>	De lunes a viernes, sin operar en las noches o fines de semana	-	-
Base	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central nuclear</li> <li>Central de vapor de alto rendimiento</li> <li>Ciclo combinado de alto rendimiento</li> </ul>	Tiempo de respuesta lento a los cambios de la demanda	A toda su capacidad la mayor parte del año	Alto costo de inversión y bajo de generación	-

Fuente: Tabla elaborada con información del estudio *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico (COPAR Generación 2015)* de la CFE (2015).

Al cierre de 2017, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) contaba con 797 centrales de generación eléctrica, con una capacidad de generación total de 75,685 MW, de los cuales el 70.5% (53,358 MW) provino de 526 centrales eléctricas convencionales. El 29.5% restante, equivalente a 22,327 MW, provino de 271 centrales con tecnologías limpias (SENER, 2018b).

En ese mismo año, la generación bruta de energía eléctrica fue de 329,162 GWh, de los cuales el 78.9% (259,766 GWh) fue producido por tecnologías convencionales y el 21.1% restante, equivalente a 69,397 GWh, por tecnologías limpias (ver Figura 2.1). Cabe destacar que el 80.1% de la generación por tecnologías convencionales corresponde a centrales de ciclo combinado (63.6%) y a termoeléctricas convencionales (16.5%) (SENER, 2018a).

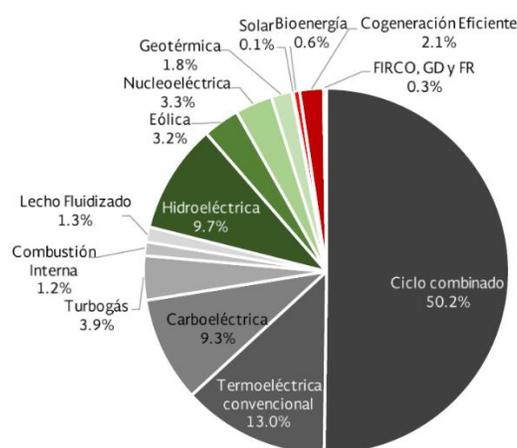


Figura 2.1. Generación bruta de energía eléctrica en México en 2017, clasificada por tecnología.

Fuente: Tomado de la Secretaría de Energía (SENER, 2018b, p. 48).

Para los fines de este estudio, en la siguiente sección se describen las características técnicas de las tecnologías convencionales con mayor participación en la matriz de generación eléctrica.

## 2.2 Centrales termoeléctricas

En una central térmica o termoeléctrica, la energía eléctrica se genera a partir de la energía liberada en forma de calor, producto de la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón (D'Addario, 2018).

Estos combustibles son hidrocarburos formados por una gran cantidad de compuestos complejos, cuyos elementos principales son carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno; además, contienen materia mineral y humedad en cierto grado. Sin embargo, en un combustible solamente hay tres elementos importantes: carbono, hidrógeno y azufre —siendo el carbono el principal elemento. Durante el proceso de combustión, los combustibles fósiles generan una cantidad considerable de calor por unidad de masa o volumen al reaccionar con un oxidante (Sarkar, 2017). A través de un ciclo termodinámico, este calor se emplea para mover un generador y producir energía (D'Addario, 2018).

En términos generales, una central termoeléctrica tiene tres componentes principales: una caldera —en donde se produce la combustión—, una turbina o motor de calor —en donde la energía térmica proveniente de la combustión se transforma en energía mecánica— y un generador, en donde la energía mecánica se convierte en energía eléctrica (Superintendencia del Medio Ambiente [SMA], 2014).

Dependiendo de la tecnología empleada para hacer girar el rotor de los generadores eléctricos, las centrales termoeléctricas se clasifican en termoeléctricas convencionales, centrales turbogás y centrales de ciclo combinado.

### 2.2.1 Central termoeléctrica convencional (o de vapor)

Este tipo de central tiene como principio de funcionamiento el ciclo Rankine: la energía mecánica que se necesita para activar los generadores eléctricos proviene del vapor generado en la caldera (SMA, 2014).

Las calderas y los subsistemas asociados incluyen a menudo componentes para mejorar la eficiencia termodinámica aumentando la temperatura del vapor y precalentando el aire de admisión mediante el uso de sobrecalentadores, recalentadores, economizadores y calentadores de aire (EPA, 2009).

En el generador de vapor, la energía química disponible en los combustibles fósiles se convierte en energía térmica mediante la combustión. El calor liberado es absorbido por agua a baja temperatura para convertirse en vapor de alta presión en el generador de vapor (Sarkar, 2017; SMA, 2014).

El vapor a alta temperatura y alta presión sale de la caldera y entra a la turbina, donde hace girar los álabes que accionan el generador, produciendo electricidad. El vapor a baja presión que sale

de la turbina ingresa al condensador, donde es enfriado y condensado por el agua de enfriamiento que fluye a través de los tubos del intercambiador de calor (condensador). El agua recolectada en el condensador (condensado) se envía de vuelta a la caldera, donde nuevamente se convierte en vapor. Por otro lado, los gases de la combustión abandonan el subsistema del generador de vapor y pasan a través del sistema de recolección de partículas y de desulfuración por vía húmeda (si está presente), para posteriormente ser expulsados a la atmósfera a través de la chimenea (ver Figura 2.2) (Babcock y Wilcox, 2005, citado por EPA, 2009). El fluido de trabajo en este tipo de central es agua-vapor.

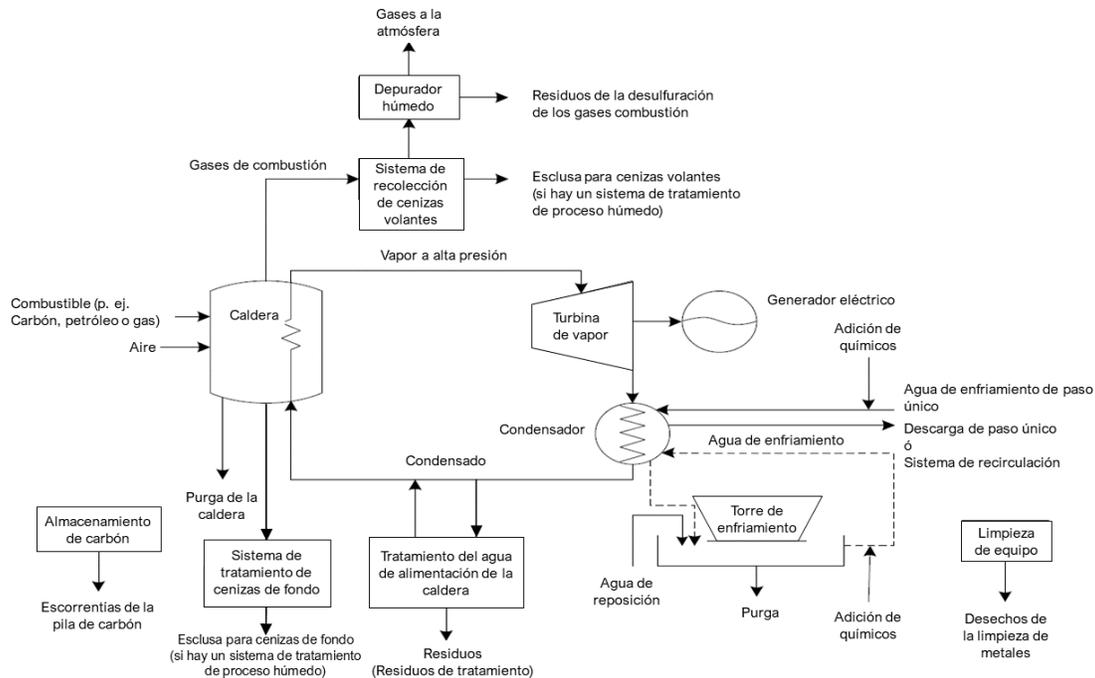


Figura 2.2. Diagrama de una central termoeléctrica convencional

Fuente: Tomado y adaptado de *Steam Electric Power Generating Point Source Category: Final Detailed Study Report* (EPA, 2009, p.52).

Las centrales termoeléctricas emplean combustibles tales como el carbón, gas natural y derivados del petróleo —el diésel y el combustóleo—, que se caracterizan por su alto nivel de emisiones contaminantes. Una termoeléctrica convencional emite en promedio 680 kg de CO<sub>2</sub> por cada MWh de energía eléctrica producida (SENER, 2018a)

Además, su eficiencia térmica es de alrededor del 35%, es decir, solo 35% de la energía del combustible se transforma en electricidad. El 65% restante se pierde: cerca de un 10% se libera a través de la chimenea y el 55% restante normalmente se descarga con el agua de enfriamiento del condensador.

Debido a lo anterior, México, siguiendo la pauta de otros países, ha optado por sustituir esta tecnología por otras de mayor eficiencia y menor impacto ambiental (SENER, 2018a).

### 2.2.2 Turbina de gas

Una turbina de gas —llamada también turbina de combustión o turbogás— es un motor rotativo que extrae energía de un flujo de gases de combustión y está compuesta por un compresor, una cámara de combustión y una turbina (ver Figura 2.3). Su principio de operación está basado en el ciclo termodinámico Brayton —también conocido como ciclo Joule— (Sarkar, 2017).

El aire entra a presión atmosférica al compresor, en donde su temperatura y presión se elevan. Posteriormente, este aire comprimido ingresa a la cámara de combustión, en la cual, después de mezclarse con el combustible (líquido o gaseoso), se enciende, liberando energía.

Los gases calientes resultantes de la combustión son dirigidos hacia una turbina. A medida que estos gases comprimidos se expanden, hacen girar los álabes de la turbina que mueven el eje, accionando el compresor y el generador, produciendo energía eléctrica.

En una turbina de gas de ciclo abierto, los gases de escape son generalmente liberados a la atmósfera; en las de ciclo cerrado, los gases calientes van a un regenerador para pasar nuevamente al compresor (OPEXenergy, s.f.).

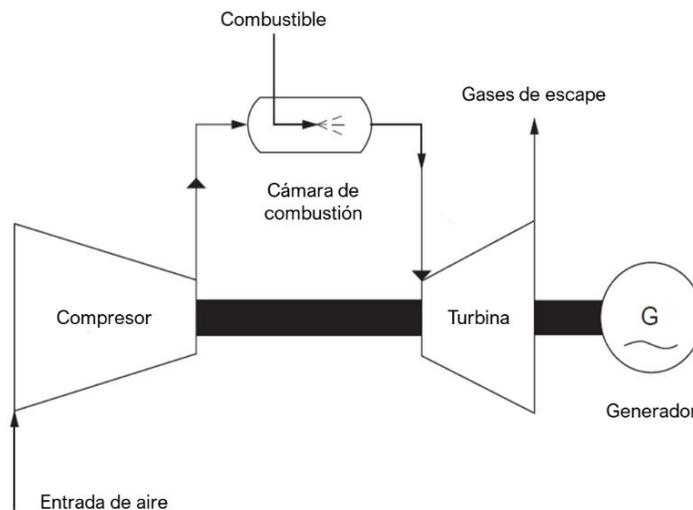


Figura 2.3. Diagrama de una central turbogás de ciclo abierto

Fuente: Tomado y adaptado de Sarkar (2017, p. 27).

Las plantas accionadas por turbinas de gas son ideales para satisfacer la demanda pico de electricidad debido a su capacidad de arranque y paro rápido; utilizan gas natural y diésel como combustible principal y emiten en promedio 509 kg de CO<sub>2</sub> por MWh con gas, o más de 660 kg de CO<sub>2</sub> por MWh con diésel (SENER, 2018a). En el pasado estas turbinas eran menos eficientes que el resto de las tecnologías convencionales (ofrecían una eficiencia media de 36%), pero en la actualidad esto ha cambiado mucho; ahora, las turbinas en ciclo abierto pueden ofrecer eficiencias de hasta 43%, más que cualquier planta termoeléctrica convencional y con capacidades de hasta 240 MW por unidad.

### 2.2.3 Centrales de ciclo combinado

Las plantas de ciclo combinado conjuntan dos ciclos termodinámicos para transformar trabajo mecánico en energía eléctrica. Los gases de escape generados en la turbina de combustión (ciclo Brayton) son aprovechados para calentar agua en una caldera de recuperación y producir vapor para accionar la turbina de vapor (ciclo Rankine) (Cengel & Boles, 2011). El trabajo mecánico realizado es transmitido al eje del generador para producir energía eléctrica. El vapor se condensa a la salida de la turbina de vapor y es conducido a la caldera para producir vapor nuevamente. El proceso de condensación requiere de un sistema de enfriamiento que puede ser abierto sin recirculación o de paso único, húmedo de circuito cerrado (torre de enfriamiento) y enfriamiento con aire seco (aerocondensadores) (SMA, 2014). Una vez condensado, el vapor es llevado al tanque de alimentación (ver Figura 2.4).

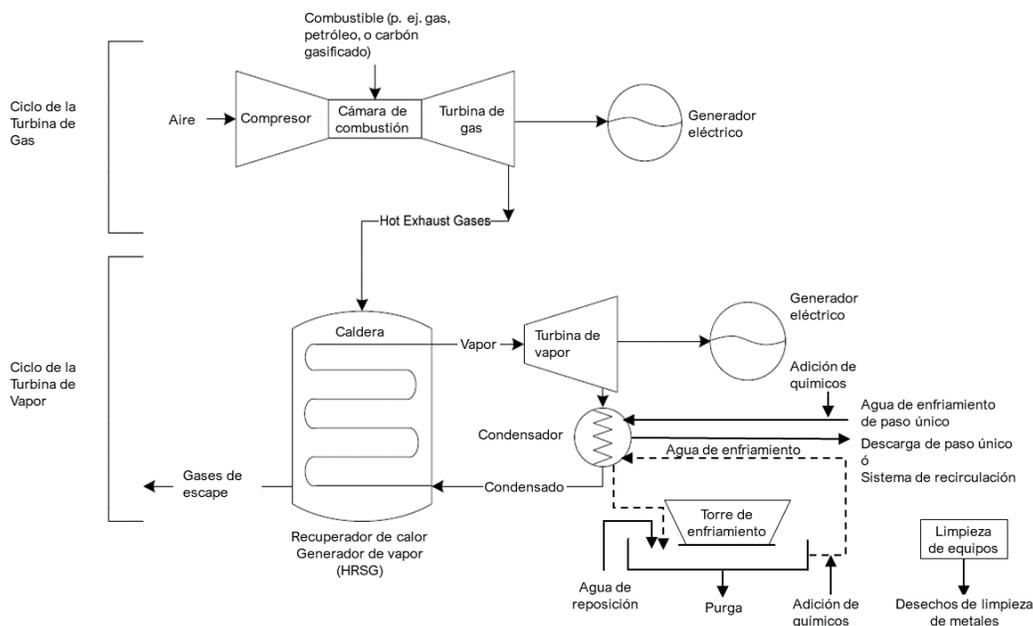


Figura 2.4. Diagrama de una central de ciclo combinado

Fuente: Tomado y adaptado de la EPA (2009, p. 65).

Las plantas de ciclo combinado presentan dos sistemas de alimentación de agua para el funcionamiento de la planta: el agua desmineralizada —que circula por la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (Heat Recovery Steam Generator [HRSG]) y el condensador (ciclo agua-vapor)— y el agua de enfriamiento —que circula por el condensador y la torre de enfriamiento (García et al., 2008).

Las plantas de ciclo combinado se caracterizan por operar de forma continua —siempre y cuando cuenten con el suministro adecuado de combustible y agua. La eficiencia de este tipo de central es mayor a la de otras tecnologías convencionales —es 1.4 veces mayor que la eficiencia de una termoeléctrica convencional— y emite en promedio 346 kg de CO<sub>2</sub> por MWh, que es un valor menor a la media del sector eléctrico (SENER, 2018a).

Debido a que la planta en estudio utiliza esta tecnología, en el Capítulo 3 se describirá más detalladamente su estructura y funcionamiento.

#### 2.2.4 Carboeléctricas

El carbón es una roca sedimentaria orgánica, cuyos componentes principales son macérales — restos vegetales macerados que conforman la parte orgánica— y cenizas —componentes inorgánicos no combustibles.

Las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) fijan un estándar en la clasificación de los carbones:

- Bajo rango: su poder calorífico es menor a 6,390 kcal/kg; esta categoría incluye los subbituminosos y los lignitos
- Alto rango: su poder calorífico es superior a 6,390 kcal/kg; esta categoría incluye los bituminosos y antracitas

Entre mayor sea el contenido de carbón y menor el contenido de humedad, mayor será su contenido energético y valor comercial, tal es el caso del carbón térmico y el carbón metalúrgico.

El carbón térmico se utiliza para producir calor, principalmente en hornos, generación de vapor y en otros sistemas térmicos. Por su alto contenido de energía, es utilizado principalmente en las centrales termoeléctricas. El carbón metalúrgico se utiliza en el área siderúrgica para la producción de coque (Secretaría de Economía [SE], 2014).

Una central carboeléctrica es una termoeléctrica convencional cuyo combustible principal es el carbón. En este tipo de centrales, el generador de vapor es más complejo, de mayores dimensiones y con superficies más grandes para la transferencia de calor. Además, se requiere de un tratamiento especial que consiste en la pulverización y secado del carbón, así como de sistemas anticontaminantes como colectores de bolsas y equipos de desulfuración (ver Figura 2.5).

Una carboeléctrica es más eficiente que una termoeléctrica convencional; sin embargo, el uso del carbón produce grandes cantidades de emisiones atmosféricas (en promedio emite 773 kg de CO<sub>2</sub> por MWh) y afecta a los equipos y materiales de la central generadora. A fin de mitigar el nivel de emisiones atmosféricas, se pueden integrar a dichas centrales sistemas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (SENER, 2018a).

México cuenta con tres centrales carboeléctricas, que aportaron el 9% de la generación de electricidad en 2017.

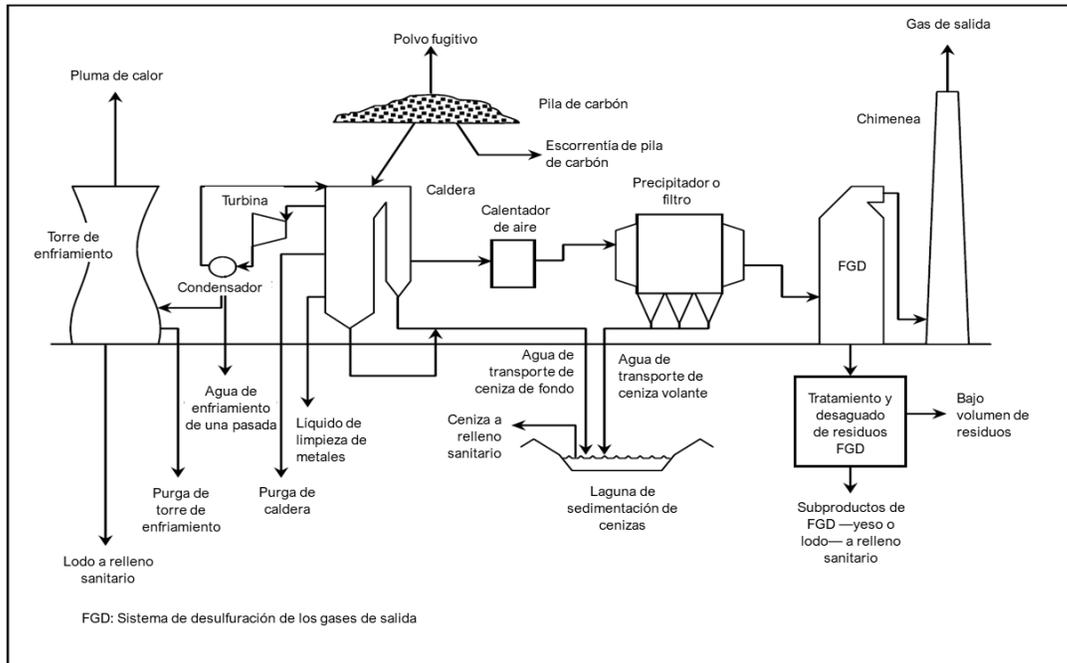


Figura 2.5. Diagrama de una termoeléctrica convencional a base de carbón

Fuente: Tomado y adaptado de BS Consultores (2007).

## 2.3 Calidad del agua en las centrales termoeléctricas

El agua posee una gran capacidad para absorber calor: su volumen aumenta 1,600 veces a medida que se evapora para formar vapor a presión atmosférica y este vapor es capaz de almacenar gran cantidad de calor (Lenntech, s.f.-b). Debido a estas características, las tecnologías generadoras de electricidad utilizan agua para diferentes procesos; por ejemplo, las centrales de concentración de energía solar (termosolares), las que utilizan biomasa, carbón, gas natural y combustible nuclear generalmente emplean agua como medio de enfriamiento para condensar vapor y como fluido de trabajo (Macknick, Newmark, Heath & Hallet, 2011).

Existen dos fuentes de abastecimiento de agua: superficiales —ríos, lagos, lagunas, mares y represas— y subterráneas —agua de pozo (Santana-Rodríguez, Nápoles-García & de la Cruz-Aragoneses, 2012).

El agua de la naturaleza contiene sólidos y gases disueltos (oxígeno, dióxido de carbono) que varían en cantidad dependiendo de la fuente de agua cruda.

Kiely (1999) señala que, dependiendo del tamaño de la partícula, los sólidos se clasifican en

- disueltos: el tamaño de la partícula oscila entre  $10^{-6}$  y  $10^{-9}$  mm; esta categoría incluye sales minerales, sustancias orgánicas y sílice
- coloidales: el tamaño de la partícula se encuentre entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$  mm
- suspendidos o no filtrables: partículas finas de entre  $10^0$  y  $10^{-3}$  mm

Las impurezas provienen del suelo por donde pasa el agua o caen del aire. El tiempo de contacto y la velocidad de la corriente determinan el tipo de impureza. Generalmente, las aguas superficiales contienen más gases disueltos y sólidos suspendidos y menos sólidos disueltos (Kenny & Pope, 2000). La cantidad de minerales disueltos en el agua puede variar desde 30 g/l, para el agua de mar, hasta de 0.005 a 1,500 mg/l, para el agua dulce (Lenntech, s.f.-b).

Las impurezas presentes en el agua pueden provocar problemas graves de corrosión y formación de depósitos en la caldera y en el sistema de enfriamiento; por esta razón, es necesario poner especial cuidado en la calidad del agua empleada para generar vapor.

La eliminación del contenido de impurezas en el agua comienza con un pretratamiento externo que le da al agua la condición de entrada al proceso de tratamiento de desmineralización de la planta (García et al., 2008).

Aguilar (1981) señala que las principales formas de tratamiento de agua para una planta termoeléctrica son:

- tratamiento físico: decantación, filtración y coagulación
- eliminación de aceite: proceso mecánico, físico o químico
- tratamiento químico: suavización, desmineralización parcial y desmineralización total
- desgasificación
- tratamiento térmico (evaporación)
- desgasificación química

El agua cruda que entra a la planta contiene un nivel variable de sólidos suspendidos. Estas partículas pequeñas y finamente divididas deben ser «agrupadas» en partículas más grandes y pesadas para ser removidas. Este proceso se lleva a cabo añadiendo coagulantes y floculantes. Los procesos de coagulación y floculación son simultáneos y facilitan el retiro de los sólidos suspendidos y de las partículas coloidales (Ashland Water Technologies, 2013).

Las dos opciones principales para producir agua desmineralizada adecuada para suministrar a la caldera son la ósmosis inversa (OI) y las resinas de intercambio iónico (II) (Purolite International, 2003). La tecnología de ósmosis inversa es efectiva para remover concentraciones de sólidos disueltos totales de hasta 45,000 mg/l. En cambio, la de intercambio iónico se considera poco práctica para el tratamiento de agua con alto contenido de sólidos disueltos (Younos & Tulou, 2005).

Para que las resinas de intercambio iónico se desempeñen de manera óptima deberán regenerarse tan pronto como alcancen su nivel de saturación. La conductividad eléctrica es el parámetro que se monitorea para determinar si es necesaria la regeneración de las resinas. El agua con un alto grado de pureza tendrá poca conductividad. Una resina saturada dejará pasar un poco de agua sin tratar, lo que incrementará la conductividad del agua. Para la regeneración se utilizan compuestos químicos ácidos y cáusticos, y el producto de este tratamiento es una solución salina que contiene las sustancias contaminantes eliminadas (Freeman, 1998).

En algunas instalaciones, el tratamiento de OI es utilizado antes que el tratamiento de II. El sistema de OI puede aportar agua con cierta pureza al sistema de II, reduciendo la frecuencia de regeneración de las resinas y el volumen de compuestos químicos empleados. Sin embargo, la desventaja principal del sistema de tratamiento OI es que el volumen del agua de rechazo es mayor que el del agua desmineralizada producida. La proporción entre agua tratada y agua rechazada guarda una relación directa con el grado de impurezas que deban eliminarse (Freeman, 1998).

### 2.3.1 Calidad del agua en la caldera

La eficiencia y seguridad con que operan las calderas de vapor, su costo de operación y su durabilidad dependen de la calidad del agua de alimentación.

La composición del agua que alimenta a la caldera debe ser tal que las impurezas presentes en la misma se puedan concentrar un número razonable de veces dentro del sistema sin que por ello se superen los límites permitidos por el fabricante. Si el agua no cumple este requisito, será necesario tratarla para eliminar todas las impurezas antes de utilizarla. Por esta razón, actualmente se están utilizando tratamientos químicos, los cuales están resultando una solución efectiva a la par que económica (Lenntech, s.f.-b).

Severns, Degler, Miles y Gayán (2007) señalan que, desde el punto de vista químico, las impurezas en el agua pueden causar efectos perjudiciales, entre los cuales se encuentran los siguientes:

1. Reducción de la cantidad de calor transmitido debido a la formación de incrustaciones sobre la superficie de calentamiento.
2. Perdidas caloríficas debido a frecuentes purgados.
3. Corrosión y fragilidad del acero de la caldera; la causa principal es el oxígeno.
4. Formación de espumas y arrastres de agua por el vapor; ocurren principalmente cuando el agua de la caldera contiene álcalis.
5. Mal rendimiento de los equipos que utilizan vapor sucio.
6. Costos elevados de limpieza, reparaciones, inspección, mantenimiento y equipos de reserva.

La corrosión y la formación de incrustaciones son los problemas más serios de un sistema de producción de vapor, ya que dañan irreversiblemente la estructura de los equipos, acortando su vida útil. Estos problemas se presentan con frecuencia de forma grave en el ciclo agua-vapor de las plantas de ciclo combinado e incluyen fallas en los tubos del calentador, corrosión en las turbinas, deposición y corrosión acelerada (EPRI, 2013).

La corrosión es la reacción química o electroquímica que se realiza entre un metal y el medio, ocasionando la degradación y la pérdida de las propiedades del metal. Se produce por el oxígeno disuelto en el agua, por el dióxido de carbono o por ácidos.

La corrosión inicia en la superficie metálica, propagándose hacia el interior, dando como resultado la pérdida de espesor y de cualidades mecánicas, así como el desprendimiento de material que puede acumularse en ciertos puntos de la instalación.

Por su parte, las incrustaciones son sales de calcio y magnesio que, al calentarse, se concentran y precipitan dando lugar a depósitos que forman una capa aislante que dificulta el intercambio de calor.

Las sustancias que causan problemas de incrustaciones son principalmente productos de la corrosión que se forman en la caldera o entran en la caldera desde las líneas de alimentación y condensado. Los componentes de las incrustaciones son generalmente óxidos de hierro. Y en el caso donde el cobre y las aleaciones de cobre son utilizados para los equipos auxiliares del agua de alimentación y líneas de condensado, las incrustaciones son por cobre, níquel y zinc.

La incrustación disminuye drásticamente el coeficiente de transferencia de calor, por lo que la energía térmica generada en la combustión no se transmite eficientemente. Esto da como resultado mayores consumos de combustible por kilogramo de agua evaporada y fatiga mecánica —es decir, el desgaste acelerado de los tubos y accesorios de la caldera— por sobrecalentamiento de la estructura metálica (Rocha Castro, 2010).

En la caldera y el ciclo agua-vapor (CAV), las partes más afectadas son las partes frías —el circuito de alimentación y los economizadores— y no así las partes calientes, ya que de manera natural se forma una capa superficial de óxido de hierro (magnetita) que impide que la oxidación progrese al interior del metal. Sin embargo, los desprendimientos de las partes frías afectarán a las partes calientes. Estos desprendimientos, que no son solo incrustaciones de calcio y magnesio sino también de sílice, pueden afectar las partes en movimiento, como las válvulas y los álabes de la turbina de vapor, provocando la degradación acelerada de los álabes y desequilibrios en el rotor de la turbina.

El agua de alimentación de la caldera se forma con el condensado, proveniente del CAV, o con agua desmineralizada del tanque y, algunas veces, con una mezcla de ambos. Antes de entrar a la caldera, se le añade al agua un conjunto de sustancias para el control del pH y del oxígeno disuelto en la fase líquida. Para controlar el pH, se suele adicionar amoníaco y fosfatos, que actúan como reguladores en la fase vapor y en la fase líquida (García et al., 2008); para remover el oxígeno disuelto, se utilizan sulfito de sodio, hidracina, aminas y taninos; para el control de incrustaciones, se emplean compuestos de sodio como hidróxidos, fosfatos y polifosfatos; para controlar el dióxido de carbono y el pH, se añaden ciclohexilamina y morfolina; y para dispersar los sólidos suspendidos, se emplean taninos, polímeros sintéticos o almidones. Este tratamiento químico permite que el agua suministrada a la caldera contenga la menor cantidad de impurezas posible, previene la corrosión y hace que los componentes que forman la incrustación sean partículas insolubles y dispersas en el agua, que serán descargadas en el agua de purga (Kurita Water Industries Ltd. [Kurita], 1999).

La presión del vapor determina la temperatura, la capacidad energética y la calidad del agua de alimentación de la caldera. Entre más alta sea la presión, más estricta deberá ser la calidad del agua (Santana-Rodríguez et al., 2012).

La mayoría de las calderas de baja presión ( $< 20 \text{ kgf/cm}^2$ ) utiliza agua cruda o agua suavizada como agua de alimentación, y usualmente no se emplea ningún equipo para eliminar oxígeno y  $\text{CO}_2$  (desgasificador). Se presentan problemas de dureza, incrustaciones de sílice y corrosión por oxígeno disuelto y  $\text{CO}_2$  en la línea de condensado.

En calderas de media y alta presión ( $20\text{-}75 \text{ kgf/cm}^2$  y mayores a  $75 \text{ kgf/cm}^2$ , respectivamente) se suministra generalmente agua desaireada y desmineralizada como agua de alimentación. La presencia de una pequeña cantidad de impurezas puede causar problemas como, por ejemplo, depósitos de óxidos metálicos sobre la superficie de calentamiento de la caldera, corrosión de los equipos auxiliares y adhesión de escamas en los sobrecalentadores o en los álabes de las turbinas (Kurita, 1999).

La principal causa de arrastre en las calderas de media y baja presión es la disolución en el vapor de sales disueltas y óxidos de metal del agua del calentador. La solubilidad de sales y óxidos de metal en el vapor es cada vez mayor conforme la presión y la temperatura se incrementan. El arrastre de la sílice es el problema principal, especialmente en calderas con presión supercrítica, porque la solubilidad de la sílice es mayor en el vapor que cualquier otro óxido de metal y otra sal.

Cuando el vapor que llega a la turbina contiene sales de sílice y otras sales, éstas se depositan y se adhieren a los álabes y a las toberas de la turbina, reduciendo su eficiencia. Para prevenir este problema, es necesario mantener una concentración por debajo de  $0.02 \text{ mg/l}$  de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en el vapor y en el agua de la caldera. El origen de este problema se debe a condiciones pobres de operación en la desmineralización o a la presencia de sílice coloidal en el agua de alimentación (Kurita, 1999).

### **2.3.2 Calidad del agua en el sistema de enfriamiento**

El flujo de agua de este sistema se utiliza para enfriar el condensador principal, el aceite de la turbina, el generador, los componentes del sistema auxiliar —como bombas, ventiladores, etc.— y el compresor de aire (Aguilar, 1981).

Los problemas comunes en el sistema de enfriamiento son corrosión, incrustaciones y la proliferación de especies biológicas. Cabe mencionar, que los procesos químicos solamente se aplican a los sistemas abiertos y a los cerrados con torre de enfriamiento.

En los sistemas abiertos, si el agua es tomada del mar, la corrosión se debe a la salinidad y a la alta concentración de cloruros; las partículas que circulan en los tubos del condensador pueden ensuciarlos y depositarse, dando lugar a choques o turbulencias, llegando incluso a perforarlos. Además, las especies biológicas, especialmente moluscos, pueden adherirse a las paredes de los tubos. Otros organismos que es necesario evitar son las algas y las bacterias.

En los sistemas cerrados con torre de enfriamiento, una parte del agua se pierde por evaporación y, por lo tanto, se concentran las sales disueltas y sólidos en suspensión. Al alcanzar su límite de solubilidad, las sales de calcio y magnesio se depositan a lo largo del circuito de agua en circulación, provocando incrustaciones. Las pérdidas de agua en el circuito son por evaporación,

por fugas y por las purgas que mantienen la concentración de sales en los límites, y es necesario reponer el agua para mantener el volumen constante en circulación (García et al., 2008).

Las pérdidas de agua por evaporación varían de un sistema de enfriamiento a otro. La cantidad de agua perdida depende de las condiciones específicas de la planta y de las condiciones ambientales. Los lagos, ríos, estanques, embalses y estuarios solamente pierden cerca del 40% de su calor por evaporación. Las torres de enfriamiento húmedas pierden 75% o más de su calor por evaporación, y las torres de enfriamiento en seco (aerocondensadores) no pierden calor por evaporación (Sax, 1974).

La cantidad de agua perdida por evaporación es una función de la temperatura del bulbo húmedo del aire, la humedad relativa, la nubosidad, la velocidad del viento, el rango de enfriamiento y las pérdidas de calor por otros mecanismos (Sax, 1974).

A través de las purgas, se pierde entre un 0.5 y un 3% del agua en circulación. Esta pérdida está en función de la calidad inicial del agua, la concentración de sólidos naturales disueltos, los productos químicos añadidos para la protección contra la corrosión y la acumulación de incrustaciones en las superficies de transferencia de calor. La purga debe cumplir los estándares de calidad del agua de la zona de descarga (Sax, 1974).

Las purgas mantienen la calidad del agua deseada en términos de ciclos de concentración (COC). Un COC indica el número de veces que las partículas que constituyen el agua de repuesto se concentran en la torre de enfriamiento a medida que se evapora el agua. Este número se controla a través de las purgas y se evalúa a través de mediciones de conductividad o de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua (Swapan & Debnath, 2015).

Un programa efectivo de tratamiento químico del agua de enfriamiento debe controlar de manera simultánea cuatro problemas: corrosión, incrustación/deposición inorgánica, ensuciamiento y microorganismos (capaces de causar corrosión y deposición).

Para proteger las instalaciones de las incrustaciones y de la corrosión, se añaden antiincrustantes y antioxidantes. El pH del agua de enfriamiento puede influir en la función de estos compuestos, por lo que es necesario modificarlo añadiendo ácido sulfúrico para disminuirlo (García et al., 2008). Además, es necesario realizar las purgas de forma adecuada. De lo contrario, las incrustaciones y la corrosión en tuberías podrían persistir a pesar de que se administre un tratamiento químico apropiado (Swapan & Debnath, 2015).

Otro problema que se presenta en el agua de enfriamiento es el crecimiento microbiológico. Un control eficaz de la contaminación biológica evita corrosión grave y reducciones en la transferencia de calor y potencia. Para ello se puede adicionar un halógeno oxidante como cloro, hipoclorito de sodio (NaOCl) u otro agente para el control microbiológico (biocida) y un biodispersante para mejorar la eficacia de los biocidas (Selby, Puckorius & Helm, 1996). El biocida impide que en las tuberías o en los haces tubulares del condensador proliferen algas o cualquier otro organismo, como la bacteria *Legionella* causante de enfermedades respiratorias que pueden, incluso, provocar la muerte (Marcó, 2001).

## 2.4 Operación y mantenimiento en las centrales termoeléctricas

Dado que la producción de energía debe coincidir con la demanda instantánea, es necesario que las centrales tengan cierta versatilidad en su operación. Un ejemplo de esta versatilidad es el caso de las plantas de ciclo combinado, las cuales varían su carga con rapidez, el mínimo técnico de operación es bajo y el periodo de arranque y parada es corto (entre 3 y 6 horas para el arranque y alrededor de 1 hora para la parada). En esas condiciones es posible subir la carga durante las horas de mayor demanda energética o bajarla hasta su mínimo técnico (25-50% de la carga máxima) en las horas donde la demanda es baja (García et al., 2008).

La fiabilidad y disponibilidad de una central termoeléctrica dependen de la calidad de su instalación, operación y mantenimiento. Éste puede ser correctivo o programado. El primero corresponde a la reparación de averías cuando se presentan; el segundo consiste en la elaboración de un plan a partir de un análisis tomando en cuenta todos los posibles fallos que pudieran tener los equipos —principales y auxiliares— y las instrucciones de operación del fabricante.

Para la generación de energía eléctrica, se realizan diferentes transformaciones de energía; dadas las pérdidas existentes en dichas transformaciones, se definen diferentes tipos de eficiencias.

De acuerdo con Cengel y Boles (2011), la **eficiencia del generador eléctrico** ( $\eta_{\text{generador}}$ ) es el cociente que resulta de dividir la potencia eléctrica ( $P_{\text{elec}}$ ) entre la potencia mecánica ( $P_{\text{mec}}$ ), esto es

$$\eta_{\text{generador}} = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{mec}}}$$

La **eficiencia térmica** de una planta ( $\eta_{\text{térmica}}$ ) se define como el cociente que resulta de dividir el trabajo neto de salida del eje de la turbina ( $w_{\text{mec}}$ ) entre el calor de entrada del fluido de trabajo ( $w_{\text{ter}}$ ), es decir

$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{w_{\text{mec}}}{w_{\text{ter}}}$$

La **eficiencia de combustión** ( $\eta_{\text{combustión}}$ ) es el cociente que resulta de dividir la cantidad de calor liberado durante la combustión ( $Q$ ) entre el poder calorífico del combustible quemado ( $HV$ ), esto es

$$\eta_{\text{combustión}} = \frac{Q}{HV}$$

El hidrógeno contenido en la mayoría de los combustibles forma agua durante la combustión. El poder calorífico de la combustión será diferente dependiendo del estado físico del agua (líquido o vapor) en los gases de combustión. Si el agua sale como vapor, el poder calorífico es inferior o

LHV (*lower heating value*). Si, por el contrario, el agua se condensa por completo, se recupera el calor de vaporización y el poder calorífico es superior o HHV (*higher heating value*).

La eficiencia total ( $\eta_{total}$ ) estará determinada por

$$\eta_{total} = \eta_{combustión} \eta_{térmica} \eta_{generador}$$

En una planta de generación, la **potencia** es la cantidad de energía que puede ser entregada o distribuida a un sistema en una unidad de tiempo; la **potencia efectiva** es la capacidad real de energía que las centrales pueden entregar de forma continua al mercado eléctrico (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía [SNMPE], s.f.); la **carga** es la cantidad de potencia que debe ser entregada en un punto dado de un sistema eléctrico; y el **factor de carga** se define como la relación entre la carga promedio durante un periodo de tiempo dado y la carga máxima registrada en dicho lapso.

El **factor de planta**, conocido como factor de utilización de una central, es la relación entre la energía eléctrica producida por un generador o conjunto de ellos durante un intervalo de tiempo determinado y la energía que habría sido producida si este generador o conjunto de ellos hubiese funcionado durante ese intervalo de tiempo a su máxima potencia posible en servicio. Se expresa generalmente en porcentaje (CFE, 2012).

#### 2.4.1 Composición del gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos simples compuesta en su mayor parte de metano ( $CH_4$ ). Dependiendo de su origen, puede encontrarse de manera asociada —se extrae junto con el petróleo crudo— y no asociada —se encuentra en depósitos que no contienen petróleo crudo.

El gas seco (gas natural comercial) se utiliza, entre otros usos, como combustible para la generación de energía eléctrica en las plantas de ciclo combinado. Hay dos formas de transportar el gas seco de los centros de producción: por gasoductos o en forma de gas natural licuado (GNL).

El GNL se obtiene sometiendo el gas a temperaturas bajas y presiones altas (proceso de licuefacción). Posteriormente, el gas es transportado en barcos especialmente diseñados para ello; cuando llega a su destino, el líquido es calentado para volverlo al estado gaseoso en una terminal de regasificación.

La importación del GNL en México comenzó con la recepción del primer cargamento proveniente de Nigeria en la terminal de GNL en Altamira, Tamaulipas, en 2006 —año en que comenzaron las operaciones de regasificación en dicho puerto. El gas es utilizado únicamente por la CFE para generar electricidad, como resultado de una estrategia de diversificación de la producción nacional y una reducción de la dependencia de gas proveniente de los Estados Unidos (SENER, 2014).

## 2.5 Impacto ambiental

La salud y el bienestar humano dependen de los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas. Cuando las actividades del hombre exceden la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas —por contaminación— y/o afectan la disponibilidad de los recursos —por sobreexplotación— alteran las funciones que tienen los ecosistemas para proporcionar sus bienes y servicios.

La Figura 2.6 esquematiza los efectos de los diferentes impactos ambientales sobre la salud humana. Cabe destacar que el cambio climático impacta el medio ambiente y afecta a la salud humana a través de varias vías; de ahí, la importancia de reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Nótese también que la disminución de las reservas de agua dulce tiene un efecto sobre la cantidad y la seguridad del agua que, a su vez, afecta a la salud humana.

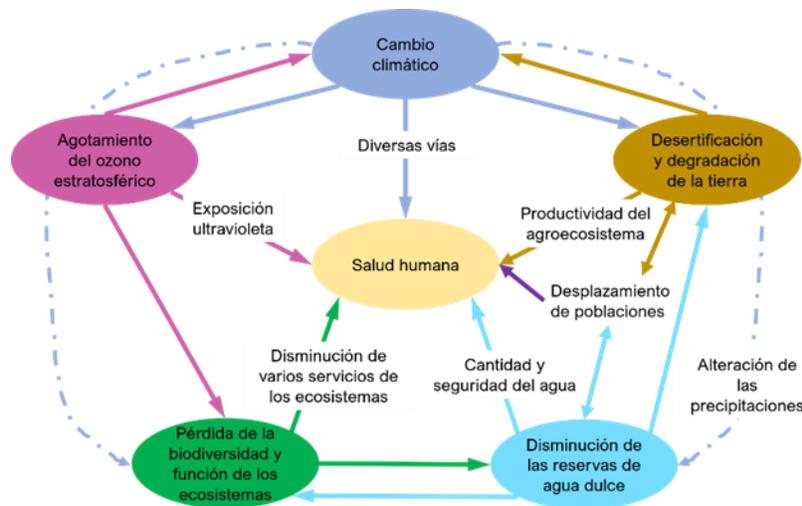


Figura 2.6. Afectaciones al ambiente y a la salud humana ocasionadas por el cambio climático

Fuente: Tomado y adaptado de la Organización Mundial de la Salud (s.f.).

### 2.5.1 Impactos ambientales relevantes por tecnología

El incremento en el consumo de energía está produciendo cambios significativos a nivel mundial en el ambiente; estos cambios incluyen el aumento de la concentración de dióxido de carbono y plomo en la atmósfera, la lluvia ácida, los residuos de plantas nucleares y la disipación del calor residual de todas las plantas termoeléctricas, que va acompañada del consumo de agua dulce (Michaelides, 2012).

Todas las tecnologías de generación de energía eléctrica, independientemente del recurso energético que emplean para su funcionamiento —combustibles fósiles, uranio o recursos renovables— contribuyen en mayor o menor grado al impacto ambiental (ver Figura 2.7), que adicionalmente repercute en las esferas económica y social.

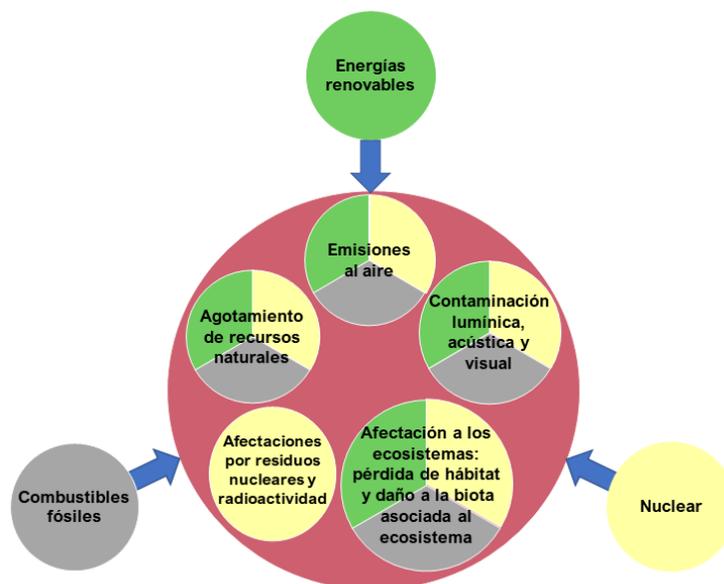


Figura 2.7. Principales impactos ambientales asociados a los recursos energéticos empleados para generar energía eléctrica.

Nota: La figura se realizó con fines ilustrativos. No representa la proporción real de la contribución de cada fuente energética a los impactos.

Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, todas las tecnologías generan emisiones al aire: mientras que las convencionales producen emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, COV, CH<sub>4</sub> y material particulado, la tecnología hidroeléctrica emite CH<sub>4</sub> y la geotérmica, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Por su parte, la tecnología eólica genera emisiones atmosféricas de forma indirecta, debido a la construcción y manufactura de los equipos necesarios para su operación. Las emisiones producidas por la nuclear se generan durante el enriquecimiento y reprocesamiento del combustible (Sánchez Hernández, Porras Loaiza, & Gutiérrez Ramírez, 2009).

Otros tipos de contaminación que producen la mayoría de las tecnologías son la visual, la auditiva y la lumínica: la imponente estructura de las centrales rompe con el paisaje, creando un impacto visual negativo; la operación de los equipos genera ruido y la emisión continua de luz artificial afecta no solamente a las comunidades aledañas, sino también a los ecosistemas y a la biota asociada.

Más aún, el cambio de uso de suelo para la construcción de las plantas ocasiona el agotamiento de recursos naturales y la pérdida de hábitats y especies animales, tal es el caso de las turbinas eólicas o aerogeneradores. La instalación de un parque eólico implica la explotación de minerales y consumo de agua para la fabricación de los componentes y la remoción de tierra, que trae como consecuencia la pérdida de vegetación y aumento de la erosión; además, el movimiento de los rotores de los aerogeneradores crea zonas de turbulencia que afectan el vuelo de las aves y murciélagos, provocando colisiones (Aves Argentinas, 2017).

La afectación a los ecosistemas también se produce de manera accidental por derrames ocasionados durante la extracción y el transporte del combustible.

Con respecto a la energía nuclear, las afectaciones al ambiente son causadas por la radiación rutinaria y accidental; además, el impacto a largo plazo de la disposición final de residuos es motivo de controversia (Sánchez Hernández, et al., 2009).

Otros impactos ambientales relacionados con las centrales termoeléctricas están vinculados al manejo de materiales peligrosos y residuos sólidos, consumo de agua y a las descargas de residuos líquidos (SMA, 2014).

Sin un pretratamiento, la descarga directa de residuos industriales sobre cuerpos de agua puede alterar la calidad del agua del cuerpo receptor, cambiar la estructura de la columna de agua (estratificación, que puede afectar los procesos de mezcla) y perturbar las comunidades bentónicas y submareales (SMA, 2014).

## 2.6 Análisis de Ciclo de Vida

La gestión ambiental para un desarrollo sostenible es de vital importancia para hacer frente a problemas como el agotamiento de recursos naturales, el calentamiento global, la contaminación o la pérdida de biodiversidad. Ante estas problemáticas, la sociedad debe adoptar un enfoque coherente y holístico que integre los aspectos ambientales, económicos y sociales.

En este contexto, una metodología que va encaminada hacia el desarrollo sostenible es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio.

### 2.6.1 Definición de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es un proceso que evalúa los impactos ambientales asociados a un producto o servicio, identificando y cuantificando la energía y materiales usados, y las salidas al ambiente. La evaluación incluye desde la extracción de las materias primas hasta el reciclaje y/o disposición final, pasando por la manufactura, transportación, distribución y uso. A estas actividades se les conoce como «de la cuna a la tumba» (ver Figura 2.8). Se trata de una herramienta que puede ser utilizada para comparar productos o servicios existentes con otros, pudiendo indicar áreas de mejora de productos existentes o ayudar en el diseño de nuevos productos (Hoof, Monroy & Saer, 2008).

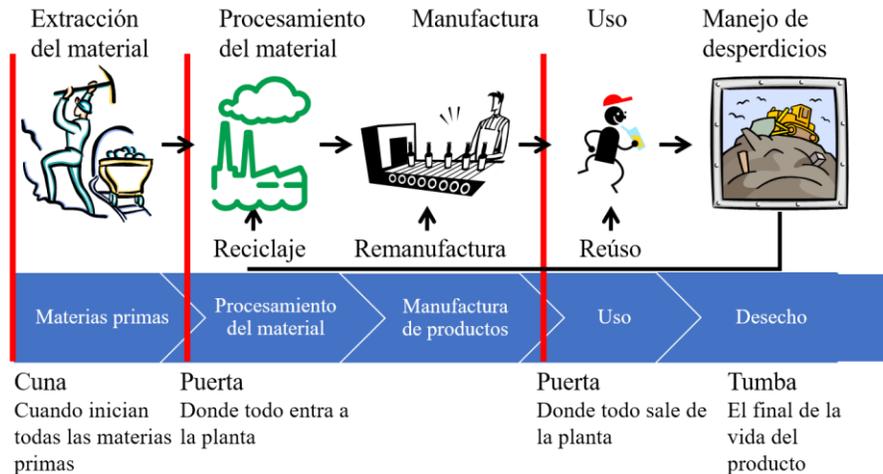


Figura 2.8. Esquema del ciclo de vida de la cuna a la tumba de un producto o servicio

Fuente: Tomado y adaptado de Hitchcock, Savelski y Slater (2011).

Las materias primas y la energía necesaria para cada etapa contribuyen a las emisiones y a los costos asociados con un producto y/o servicio.

Para la determinación de los impactos ocasionados durante la generación de energía eléctrica se aplica la metodología de ACV, de acuerdo con las normas internacionales ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. En México, las normas equivalentes son NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008, respectivamente. La primera describe los principios y el marco de referencia general del ACV, y la segunda especifica sus requisitos y lineamientos (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación [IMNC], 2008a, 2008b).

### 2.6.2 Etapas de la metodología del ACV

De acuerdo con la norma ISO 14040:2006, el ACV tiene cuatro etapas (ver Figura 2.9): definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de los resultados del ciclo de vida (IMNC, 2008a).

En la primera etapa, se define el objetivo y el alcance: se establece claramente lo que se evalúa y se incluyen, entre otros, los límites del sistema, las categorías de impacto ambiental consideradas y los límites en términos de la función que desempeña el sistema del producto que se analiza.

El **análisis de inventario** involucra la recolección de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (materia prima y energía) y las salidas (productos, subproductos, emisiones al aire, descargas al agua y desechos al suelo).

En la **evaluación del impacto** se clasifican los resultados del análisis de inventario y se cuantifica su efecto en categorías de impacto; por ejemplo, las emisiones provocadas por la quema de un combustible causan efectos en la categoría de impacto de calentamiento global, los cuales son cuantificados en kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Durante esta etapa se evalúan los posibles efectos ambientales de los resultados del análisis de inventario. Se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores y los modelos de caracterización; se asignan los resultados del inventario a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación); y se realiza el cálculo para obtener el resultado del indicador de categoría (caracterización). La metodología para la evaluación de impactos se describe en el Anexo B.

Y, por último, en la etapa de **interpretación**, los resultados obtenidos en la evaluación de los impactos se analizan para formular recomendaciones.

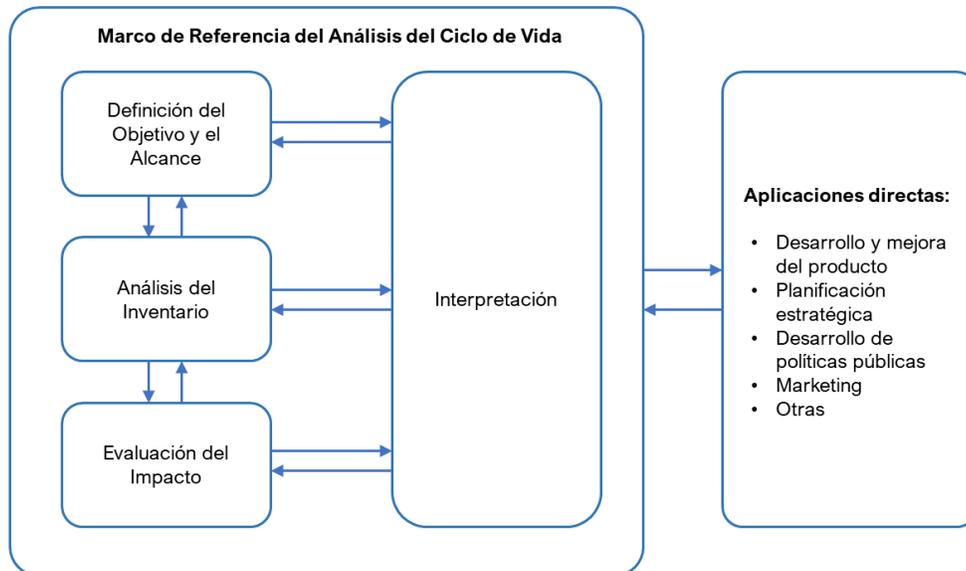


Figura 2.9. Etapas del ACV. ISO 14040:2006

Fuente: Tomado de Herranz-García y García Navarro (2018).

### 2.6.3 Métodos utilizados para evaluar los impactos

Existen diversos métodos de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), entre los que se encuentran Eco-indicator 99, EPS 2000, CML, Impact 2002+, TRACI, LIME, EcoScarcity, LUCAS, ReCiPe, ILCD y LC-IMPACT. Las diferencias entre estos métodos estriban en el número de categorías de impacto que utilizan, el número de sustancias que cubren, los modelos ambientales desarrollados para la fase de caracterización, el manejo de la incertidumbre de los datos, la validez regional, el marco temporal y los factores de normalización y ponderación empleados (Rosenbaum et al., 2018; European Commission Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability [JRC-IES], 2010).

Una diferencia importante entre los métodos es el enfoque planteado para modelar el efecto de las emisiones. Si el objetivo es analizar de qué manera y en qué punto se afecta al medio ambiente, entonces se considerarán los efectos intermedios (*midpoint*) del impacto ambiental. Si, por el contrario, se desean analizar los daños a la salud humana, el agotamiento de recursos y los daños a los ecosistemas, entonces se considerarán los efectos últimos (*endpoint*) (Universidad de Vigo, EnergyLab & Revertia, 2013).

Dos métodos que en la actualidad tienen gran aceptación son el CML y el Eco-indicator 99. El primero utiliza el enfoque de punto medio (orientado al problema). Y el segundo se centra en la interpretación de resultados y utiliza el enfoque de punto final (orientado al daño) (Goedkoop et al., 2013).

De acuerdo con Rosenbaum et al. (2018), en lugar de decidirse entre un método de punto medio o uno de punto final, es recomendable utilizar uno que proporcione ambas caracterizaciones para que apoyen la interpretación de los resultados obtenidos y se complementen entre sí.

Los métodos que combinan los enfoques *midpoint* y *endpoint* son LIME, Impact 2002+ y ReCiPe. Estos métodos fueron desarrollados para adaptarse a contextos regionales específicos: el LIME para el japonés y los métodos Impact 2002+ y ReCiPe para el europeo (JRC-IES, 2010).

Desarrollado en 2008 por el Instituto Holandés de Salud Pública y Medioambiente (RIVM), en colaboración con las Universidades de Radboud y Leiden, y PRé Consultants, el método ReCiPe integra el enfoque de punto medio del CML y el de punto final del Eco-Indicator 99 (Goedkoop et al., 2013).

El objetivo principal del método ReCiPe es transformar la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de puntuaciones de impacto ambiental. Estos indicadores expresan la severidad relativa en una categoría de impacto. Este método determina los indicadores en dos niveles: 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final (PRé Consultants, s.f.-a).

Los indicadores de punto medio se centran en problemas ambientales únicos, por ejemplo, el cambio climático o la acidificación. En cambio, los indicadores de punto final muestran el impacto ambiental en 3 niveles de agregación más altos: el efecto en la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de recursos (National Institute for Public Health and the Environment [RIVM], 2011). La Figura 2.10 muestra la relación entre los resultados del inventario, los indicadores de punto medio y los indicadores de punto final.

La conversión de puntos medios a puntos finales simplifica la interpretación de los resultados de la EICV. Sin embargo, con cada paso de agregación, se incrementa la incertidumbre en los resultados.

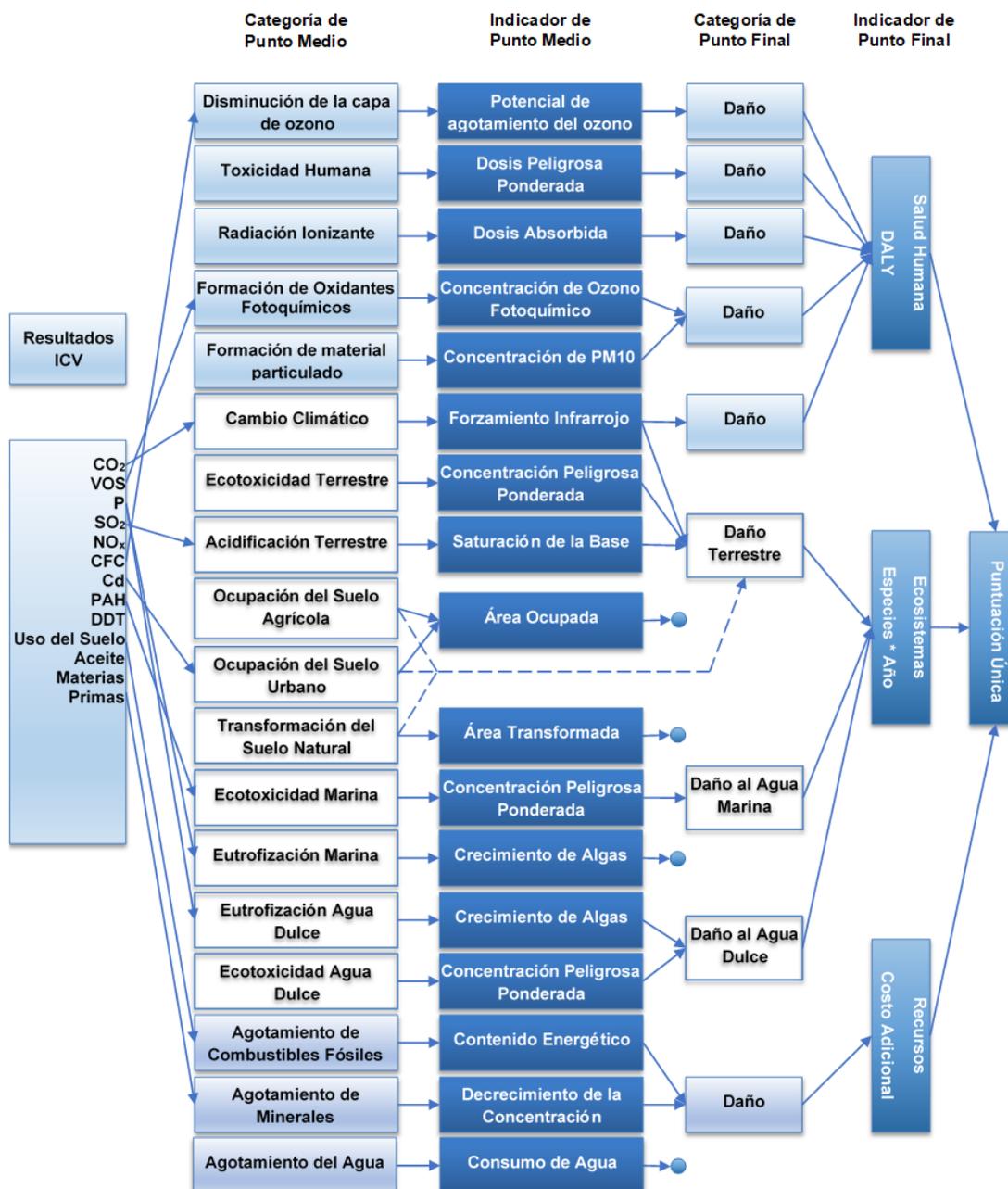


Figura 2.10. Relación entre los resultados del inventario, los indicadores de punto medio y los indicadores de punto final del método ReCiPe 2008.

Fuente: Tomado y adaptado de Goedkoop et al. (2013).

Los modelos de caracterización presentan un cierto grado de incertidumbre debido a que las relaciones modeladas reflejan un conocimiento incompleto e incierto de los mecanismos ambientales que están involucrados en el cambio climático, la acidificación, etc. Para tratar de resolver este problema, en el ReCiPe 2008 se agrupan diferentes fuentes de incertidumbre y diferentes opciones en tres perspectivas o escenarios de acuerdo con la Teoría Cultural de Thompson (Goedkoop et al., 2013). Estas perspectivas se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2  
Características de las perspectivas utilizadas en el método ReCiPe.

Perspectiva	Características
Individualista (I)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• interés a corto plazo</li> <li>• tipos de impacto que son irrefutables</li> <li>• visión optimista que supone que la tecnología puede evitar muchos problemas en el futuro</li> </ul>
Jerárquica (H)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• es un modelo de consenso</li> <li>• se basa en los principios de política más comunes con respecto al marco temporal y otras cuestiones</li> <li>• es considerado como el modelo por defecto</li> </ul>
Igualitaria (E)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• es la perspectiva más precautoria</li> <li>• toma en cuenta el marco temporal más largo</li> <li>• considera tipos de impacto que todavía no han sido completamente establecidos, pero para los cuales se dispone de alguna indicación</li> </ul>

Fuente: Tabla elaborada con información de Goedkoop et al. (2013) y PRé Consultants (s.f.-a).

## 2.7 Herramientas informáticas

El cálculo de cualquier impacto ambiental comporta un proceso complejo. Por esta razón, existe en el mercado una amplia variedad de herramientas informáticas diseñadas para llevar a cabo un ACV, realizar análisis de huella de carbono o determinar otros indicadores ambientales. Los principales elementos de estas herramientas son la base de datos utilizada para hacer los cálculos y la metodología que se aplicará. Estos elementos están relacionados y, en la mayoría de los casos, las aplicaciones de software disponibles están adecuadas para trabajar con una o más bases de datos específicas. En otros casos, se puede incorporar una base de datos particular (Ormazabal, Jaca & Puga-Leal, 2014).

La función básica de cualquier paquete informático de ACV es determinar balances de masa y energía de un elemento o modelo y asignar emisiones, usos de energía, etc. con el fin de facilitar los cálculos asociados con las etapas del análisis del inventario y la evaluación de los impactos (Ormazabal et al., 2014).

En la Tabla 2.3 se listan las características de tres de los programas más populares que existen en el mercado.

Tabla 2.3  
Cuadro comparativo de las herramientas informáticas para ACV más populares.

	GaBi	SimaPro	openLCA
Desarrollado por	thinkstep	PRé-Consultants	GreenDelta
País	Alemania	Países Bajos	Alemania
Sitio web	<a href="https://www.thinkstep.com/software/gabi-software/gabi-professional">https://www.thinkstep.com/software/gabi-software/gabi-professional</a>	<a href="https://www.pre-sustainability.com/">https://www.pre-sustainability.com/</a>	<a href="http://www.openlca.org/">http://www.openlca.org/</a>
Interfaz gráfica	Diagrama de Sankey	Diagrama de Sankey	Diagrama de Sankey
Base de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12,500 LCI datasets</li> <li>• Más de 20 bases de datos ACV thinkstep</li> <li>• ecoinvent</li> <li>• U.S. Life Cycle Inventory Database</li> <li>• Data-On-Demand Service</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agri-footprint</li> <li>• AGRIBALYSE*</li> <li>• DATASMART LCI package*</li> <li>• ecoinvent</li> <li>• ELCD</li> <li>• Environmental Footprint*</li> <li>• ESU world food LCA*</li> <li>• European and Danish Input/Output</li> <li>• EXIOBASE*</li> <li>• IDEA Japanese Inventory*</li> <li>• Industry data library: PlasticsEurope, ERASM, World Steel</li> <li>• Social hotspots*</li> <li>• Swiss Input/Output</li> <li>• U.S. Life Cycle Inventory</li> <li>• WEEE LCI (opcional)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GreenDelta ofrece bases de datos gratuitas y comerciales, incluidas ecoinvent y GaBi</li> </ul>
Metodologías de evaluación de impactos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CML 2001, v. 2016</li> <li>• ReCiPe 2016 v.1.1.1, mid- and endpoints (I+H+E)</li> <li>• TRACI 2.1</li> <li>• UBP 2013</li> <li>• EDIP 2003</li> <li>• Eco-indicator 99</li> <li>• Impact 202+</li> <li>• Environmental Footprint 2.0</li> <li>• USEtox</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CML-IA</li> <li>• Eco-Scarcity 2013</li> <li>• EDIP 2003</li> <li>• EPD 2013</li> <li>• EPS 2015d &amp; EPS2015dx</li> <li>• ILCD 2011 Midpoint+</li> <li>• Impact 2002+</li> <li>• ReCiPe</li> <li>• ReCiPe 2016</li> <li>• BEES</li> <li>• TRACI 2.1</li> <li>• Cumulative Energy Demand</li> <li>• Ecosystem Damage Potential</li> <li>• Greenhouse Gas Protocol</li> <li>• IPCC 2013</li> <li>• Selected LCI Results</li> <li>• USEtox 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CML</li> <li>• Cumulative Energy Demand</li> <li>• Eco-indicator 99</li> <li>• Eco-Scarcity 2006</li> <li>• ILCD 2011</li> <li>• ReCiPe</li> <li>• TRACI 2.1</li> <li>• USEtox</li> </ul>
Análisis de incertidumbre	Monte Carlo	Monte Carlo y otros	Monte Carlo
Intercambio de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excel</li> <li>• EcoSpold</li> <li>• Formato ILCD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ILCD</li> <li>• EcoSpold 1 &amp; 2</li> <li>• Formato CSV de SimaPro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EcoSpold</li> <li>• ILCD</li> </ul>

Tabla elaborada con información de thinkstep (s.f.), PRé Consultants (s.f.-b, 2018), Acero, Rodriguez y Citroth (2015), GreenDelta (s.f.) y Ormazabal et al. (2014).

\* Bases de datos opcionales.

El SimaPro incluye también metodologías para calcular la huella de agua.

## 2.8 Estado del arte: aplicación del ACV en plantas termoeléctricas

La producción de energía eléctrica es esencial para el bienestar económico y social de las poblaciones. Sin embargo, las tecnologías que se emplean para generar electricidad han demostrado ser las causantes de serios impactos en la salud humana y en los ecosistemas. Laurent, Espinosa y Hauschild (2018) señalan que en los últimos 20 años se han realizado más de 1,000 estudios de ACV con el fin de identificar y reducir estos impactos.

En la revisión de la literatura sobre el ACV aplicado a la generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas, se encontró que la mayoría de los estudios se enfoca en la calidad del aire, evaluando el impacto ambiental causado por el uso de combustibles fósiles. Este enfoque no supone sorpresa alguna, ya que los combustibles fósiles son los principales emisores de gases de efecto invernadero, que causan efectos nocivos en la salud humana y son los principales responsables del cambio climático.

Algunos estudios analizan los impactos ambientales del gas natural a lo largo de su ciclo de vida (Riva, D'Angelosante & Trebeschi, 2006; Dinca, Rousseaux & Badea, 2007); otros consideran el combustible y la generación de energía bajo diversas tecnologías (Hondo, 2005; Tan, Wijaya & Khoo, 2010; Santoyo-Castelazo, Gujba & Azapagic, 2011; Agrawal, Jain, S., Jain, A.K., & Dahiya, 2014). Brizmohun, Ramjeawon y Azapagic (2015) y Lelek, Kulczycka, Lewandowska y Zarebska (2016) también consideraron diferentes tipos de combustible y diversas tecnologías, y su ACV incluyó desde la extracción de los materiales hasta la distribución de la energía eléctrica.

Hay estudios más específicos y completos como el de Spath y Mann (2000), en el cual los autores realizaron el ACV de una planta de ciclo combinado para identificar las ventajas y desventajas de esta tecnología. Este análisis comprendió desde la extracción del combustible hasta el desmantelamiento de la planta, pasando por la transportación del combustible, la construcción de la planta y su operación.

Por otra parte, hay un estudio sobre plantas de ciclo combinado a gas natural con diferentes sistemas de enfriamiento en el que se determina la huella de agua mediante la aplicación de tres metodologías (Mertens, Prieur-Vernat, Corbisier, Favrot & Boon, 2015). Para su realización, se tomó en cuenta el combustible y los consumos de agua en las plantas de tratamiento de agua desmineralizada y el sistema de enfriamiento.

Laurent et al. (2018), en un análisis que realizaron sobre la aplicación del ACV a diversos sistemas de generación de energía eléctrica y calor, encontraron que la mayoría de los estudios sobre centrales de ciclo simple o ciclo combinado que utilizan gas natural delimitan su alcance a las emisiones de CO<sub>2</sub> y, en menor medida, a las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>. Y agregan que, además de las emisiones de gases de efecto invernadero en la etapa del procesamiento del combustible, también hay contribuciones significativas por emisiones fugitivas de metano y requerimientos energéticos en las fases de extracción, transporte y distribución.

Otros estudios señalan que las contribuciones dependen de la configuración de la planta, de las tecnologías empleadas para mitigar los impactos —por ejemplo, sistemas de limpieza de los gases

de escape— y la composición del combustible —por ejemplo, el contenido de azufre y metales (Dones et al., 2005, citado en Laurent et al., 2018).

Cabe mencionar que Nomura et al. (2001) y Ryberg et al. (2015), citados en Laurent et al. (2018), señalan que es posible lograr reducciones significativas en las emisiones mediante la limpieza de los combustibles; sin embargo, agregan que se tendrá que buscar un equilibrio entre los impactos causados por los procesos de limpieza y los impactos ahorrados resultantes. Un ejemplo de lo anterior es el estudio realizado por Schreiber et al (2012), citado en Laurent et al. (2018), en donde señalan que tres tecnologías de captura y almacenamiento de carbón conducen a las reducciones previstas en los impactos en el cambio climático, pero incrementan otros impactos ambientales independientemente de la tecnología de captura, el horizonte temporal y el tipo de combustible (carbón, lignito o gas natural). Además, indican que hay tres parámetros que influyen: la eficiencia de la planta y los requerimientos energéticos adicionales del proceso de captura, la eficiencia y pureza de la captura del CO<sub>2</sub> y el origen y composición del combustible fósil.

Aunque con un alto grado de incertidumbre y variabilidad en los resultados de impacto, dependiendo de los supuestos y el tipo de tecnología empleado, varios estudios sugieren que los impactos en el cambio climático generados por el gas de esquisto parecen comparables a los del gas convencional, con rangos que van de 416 a 730 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Laurent et al., 2018). Sin embargo, se encontró que los impactos en la toxicidad son mayores que los producidos por el gas convencional (Stamford y Azapagic, 2014, citado en Laurent et al., 2018).

## 3 Estructura de las plantas de ciclo combinado

### 3.1 Descripción de los componentes principales y su función

Los componentes principales de una planta de ciclo combinado son la turbina de gas, la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG), la turbina de vapor, el condensador, el generador y los sistemas auxiliares —el sistema de enfriamiento, la estación de regulación y medida (ERM) y la planta de tratamiento de agua. En las siguientes secciones se describirán las características principales de cada uno de ellos.

#### 3.1.1 Turbina de gas

Como se explicó en el Capítulo 2, en la turbina de combustión o turbogás se realiza un proceso de oxidación del combustible, transformando la energía química de éste en energía térmica, la cual se transforma, a su vez, en energía mecánica. Esto es posible porque los gases procedentes de la combustión pasan a gran velocidad a través de la turbina haciéndola girar y generan energía mecánica de rotación en el eje de la turbina. Estos gases, al salir de la turbina, tienen una temperatura de entre 400 y 620°C y son aprovechados en el recuperador de calor, en donde esta temperatura puede elevarse hasta los 800 o 900°C. Para la ignición o encendido inicial, se puede emplear gas natural; sin embargo, también es común emplear propano y butano por su mayor poder calorífico (García et al., 2008).

El nitrógeno y el aire de los sistemas auxiliares se utilizan para realizar una purga de los anillos de alimentación de gas a los quemadores a fin de liberar gases combustibles en el interior de la turbina y, con ello, evitar una explosión incontrolable. Adicionalmente, esta misma purga de aire asegura la no acumulación de gases en el interior de la caldera.

#### 3.1.2 La caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG)

La función de la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG) es transformar el agua en vapor utilizando el calor de los gases de escape de la turbina de combustión. Las calderas que comúnmente se encuentran en las centrales de ciclo combinado son acuotubulares, esto es, el agua corre en el interior de los tubos ubicados adentro de la caldera, y el intercambio de calor es por convección.

El proceso de generación del vapor en la caldera generalmente ocurre en tres etapas: 1) el agua de alimentación de la caldera pasa a través del economizador, en donde se eleva la temperatura por debajo del punto de ebullición, y pasa al domo o calderín donde se almacena; 2) posteriormente, el agua pasa a un evaporador, en donde la temperatura se eleva al punto de ebullición; y 3) finalmente, por medio de un sobrecalentador, la temperatura del vapor se eleva notablemente, más allá del punto de saturación, para evitar la presencia de gotas de agua que podrían dañar la turbina de vapor.

Las calderas en donde el agua pasa una sola vez se denominan calderas de un solo paso. Si el agua pasa más de una vez, a la caldera se le conoce como caldera clásica. En estas calderas, se genera

vapor de baja, media o alta presión, y para cada una de estas presiones, la caldera cuenta con intercambiadores de calor (economizadores, evaporadores y sobrecalentadores) y depósitos de agua o calderines. El vapor generado, bajo determinada presión y temperatura, debe tener cierta calidad química para que no degrade la instalación (García et al., 2008).

### **3.1.3 Turbina de vapor**

La función de la turbina de vapor es transformar la energía térmica en mecánica mediante la expansión del vapor. La energía térmica representa la energía interna total que contiene el vapor de agua, es decir, la suma de las energías molecular, cinética y potencial.

Lo habitual es que la turbina de vapor se encuentre dividida en tres partes: turbina de alta, media y baja presión. En cada una de ellas, se recibe el vapor que viene de la caldera recuperadora de calor, en condiciones de presión y temperatura determinadas (García et al., 2008).

### **3.1.4 Condensador**

El condensador es un intercambiador de calor que toma la mezcla de vapor-líquido que sale de la turbina y, a través de un fluido refrigerante (agua), elimina el calor que contiene dicha mezcla para transformarla en su fase líquida —agua desmineralizada. Ésta es conducida al tanque de alimentación, donde se almacena y sirve de alimentación al ciclo agua-vapor.

Otra función que tiene el condensador es eliminar gases incondensables, básicamente oxígeno, a través de su sistema de producción de vacío (eyectores y/o bombas de vacío). Si el oxígeno no es totalmente eliminado, el excedente puede ser eliminado a través de compuestos químicos como la hidracina. Si todavía hay un remanente, se elimina a través del desaireador o desgasificador —un depósito adicional vertical que se encuentra acoplado al tanque de alimentación. La desgasificación se realiza añadiendo vapor al agua para liberar el oxígeno disuelto (García et al., 2008). Cuanto más aumenta la temperatura del agua, la solubilidad del dióxido de carbono y del oxígeno disminuye. Una vez que los gases son removidos de la solución, son expulsados por medio de un flujo continuo de vapor. Para mejorar el rendimiento del desaireador, la planta tal vez necesite aumentar la temperatura y/o el flujo de vapor (Kenny & Pope, 2000).

### **3.1.5 Generador**

Los generadores eléctricos transforman la energía mecánica de rotación del eje en energía eléctrica y, además, actúan como motor durante los arranques (García et al., 2008).

### **3.1.6 Sistema de enfriamiento principal**

La combustión genera más energía térmica de la que la planta puede transformar en energía eléctrica, por lo que este sistema es importante.

Como se mencionó en el Capítulo 2, el sistema de enfriamiento puede ser de 3 tipos: abierto sin recirculación o de paso único, cerrado (en recirculación o torre de enfriamiento) y aerocondensadores.

#### *a) Sistema abierto*

El sistema abierto es el más sencillo de implantar y el más económico; además, es el que consigue una menor temperatura en el condensador. Con una menor temperatura, hay mayor condensación de vapor y aumenta el nivel de vacío en el condensador. Esto da como resultado que el foco frío de la turbina de vapor sea mayor, por lo que habrá mayor energía disponible para mover la turbina, la cual generará más energía eléctrica (García et al., 2008).

El caudal de este sistema es muy alto, por lo que su uso se restringe a centrales que se encuentren cerca de la costa y son abastecidas por agua de mar (García et., 2008). Este sistema de un solo paso siempre va acompañado de un equipo de desalación y mallas de diferente tamaño situadas a la entrada del sistema de admisión de la torre de enfriamiento. La función de estas mallas es detener escombros y especies biológicas (Swapan & Debnath, 2015).

Sin embargo, este sistema tiene un impacto en el ambiente mayor que el de los otros dos sistemas. Esto se debe a la cantidad de biocidas que contiene la descarga y a que la temperatura de descarga en el mar es mayor. Para disminuir el daño en los ecosistemas, se han propuesto límites térmicos que consisten en que el salto térmico no sea mayor a 3°C y que la temperatura del agua no sea superior a los 30°C (García et al., 2008).

#### *b) Sistema cerrado (en recirculación o torre de enfriamiento)*

Este tipo de sistema de enfriamiento se utiliza cuando no se tiene acceso a un cauce público, ya sea por razones de escasez, falta de disponibilidad de agua o factores medioambientales o legales. La ventaja de este tipo de sistema de enfriamiento es que consume menos agua y, por lo tanto, el impacto en el ambiente es menor.

Cuando el sistema emplea agua que proviene de fuentes de agua dulce —lago, río o canal—, el agua extraída pasa por un tratamiento de clarificación y posteriormente entra a un depósito donde se almacena y se utiliza para reponer el agua del ciclo (Swapan & Debnath, 2015).

Existen diferentes tipos de torres de enfriamiento, siendo la de tiro inducido la más usada. En el interior de esta torre, el agua caliente que procede del sistema de enfriamiento cae de manera uniforme. En la parte superior de la torre se encuentran unos grandes ventiladores que generan un flujo de aire ascendente que tiene una temperatura menor a la del agua. Cuando el agua caliente entra en contacto con el aire, la temperatura y humedad de éste aumentan y la del agua disminuye, formándose una película de aire húmedo alrededor de cada gota. Una parte del agua se evapora. Por la parte superior de la torre sale el aire húmedo, que solamente es visible si las condiciones ambientales (frío intenso o alta humedad relativa) no favorecen la disolución del vapor en el aire. Al vapor visible se le conoce como pluma o penacho (García et al., 2008; San Juan, 2016).

#### *c) Aerocondensadores*

El sistema de aerocondensadores es el más amigable con el medio ambiente; sin embargo, su costo es elevado y provoca un rendimiento menor en la planta.

El intercambio de calor ocurre de la siguiente manera: el vapor que proviene de la turbina de vapor se hace pasar por unos haces tubulares para aumentar la superficie de contacto del vapor. El vapor se enfría al entrar en contacto con el metal del aerocondensador y éste, a su vez, se enfría por la fuerte corriente de aire procedente de gigantescos ventiladores (García et al., 2008).

### 3.1.7 Estación de regulación y medida (ERM)

También conocida como estación de gas, la estación de regulación y medida (ERM) se encarga de revisar que el gas natural que se utiliza en la turbina de gas cuente con las condiciones adecuadas de presión, temperatura y grado de limpieza. Otra de sus funciones es la verificación de la composición química del gas, así como la cuantificación de su consumo y poder calorífico.

### 3.1.8 Planta de tratamiento de agua

Una de las causas más comunes de indisponibilidad de estas centrales es el fallo de tubos tanto de la caldera como del condensador por operar con parámetros químicos que se encuentran fuera de las especificaciones de funcionamiento.

Como se mencionó en la sección 2.3, las impurezas que se encuentran en el agua de alimentación —sólidos suspendidos, sólidos disueltos y gases disueltos en el agua— pueden ser eliminadas mediante tratamientos químicos. Sin embargo, resulta más económico retirar estas impurezas por medios físicos o mecánicos, reservando el tratamiento químico para eliminar el remanente de impurezas (Kenny & Pope, 2000).

Dos formas sencillas de eliminar estas impurezas son por medio de filtros —simples multimedia o de lecho filtrante de arena, grava y carbón de antracita— o por sedimentación, que puede acelerarse y mejorar si se le añade un coagulante o floculante (Kenny & Pope, 2000).

Para producir agua desmineralizada adecuada para su uso en la caldera, las tecnologías más utilizadas son intercambio iónico (II) y ósmosis inversa (OI).

#### a) Intercambio iónico (II)

Los problemas por sólidos disueltos también se pueden eliminar a través del tratamiento de intercambio iónico (II), que consiste en el intercambio de iones entre un sólido (material de intercambio iónico o resina) y un líquido. En este proceso no hay un cambio permanente en la estructura del sólido.

En los procesos llevados a cabo en la desalación, el II puede utilizarse para eliminar calcio, magnesio, bario y boro del agua en el pretratamiento, y boro y otras sustancias en el postratamiento.

Su principal campo de aplicación es la producción de agua desmineralizada y agua blanda para su utilización en diversas industrias, incluyendo centrales térmicas, refinerías y la industria química. El agua blanda es aquella a la que se le ha eliminado la dureza —iones de calcio y magnesio.

La ventaja del II reside en la capacidad de usar y reutilizar el material de II mediante su regeneración, la cual se hace con sodio y un ácido (Ministerio de Sanidad y Política Social [MSPS], 2009).

Por otro lado, si se requiere un mejor control de los sólidos disueltos, se puede emplear la desmineralización —otra forma de II—, que se utiliza para eliminar casi todos los sólidos disueltos para calderas de alta presión que tienen restricciones más estrictas en la química de la caldera (Kenny & Pope, 2000).

La desmineralización es un proceso reversible de intercambio de iones entre el agua y la masa filtrante granulada o insoluble (resina) contenida en un recipiente tipo filtro. La masa iónica es de naturaleza orgánica y se compone de resina sintética o carbón, donde hay grupos de cationes  $\text{Na}^+$  o  $\text{H}^+$  y grupos de aniones  $\text{OH}^-$  o  $\text{Cl}^-$ . La materia orgánica y en suspensión contenida en el agua penetra los poros de la masa iónica y la taponea, reduciendo de esta manera su funcionamiento. La resina pierde del 5 al 10% de su volumen por año debido a la degradación por rotura o pérdidas, las cuales entran a la corriente de agua (Aguilar, 1981).

Los iones cargados positivamente (cationes) —sodio, calcio, magnesio y hierro— se intercambian por iones de hidrógeno, y los iones cargados negativamente (aniones) —cloruro, sulfato y carbonato— se intercambian por iones hidróxido (Kenny & Pope, 2000).

El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) se encuentra en agua dulce normalmente en una concentración de 1 a 30 mg/l, y rara vez llega a alcanzar valores de 100 mg/l; en cambio, en aguas salobres alcanza una concentración de 1,000 mg/l. El  $\text{SiO}_2$  es un contaminante que forma incrustaciones, especialmente en los álabes de las turbinas de vapor de alta presión, y se elimina por precipitación con óxidos de magnesio o por ablandamiento con cal en frío o caliente (Jiménez, 2001).

Al pasar por la resina de II, el  $\text{SiO}_2$  se queda retenido y no sale en la regeneración, por lo que en el momento en que se satura la resina con este compuesto es necesario reemplazarla.

La operación de desmineralización puede hacerse mediante un proceso secuencial catión-anión (lechos simples o lechos estratificados) o una mezcla de resinas catiónicas y aniónicas (lechos mixtos) (MSPS, 2009).

Los desmineralizadores de lechos de cationes se regeneran con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) o clorhídrico ( $\text{HCl}$ ); los de lechos de aniones, con sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) (Kenny & Pope, 2000).

En ocasiones, y dependiendo del diseño, se puede instalar un desgasificador antes de la resina aniónica para eliminar el  $\text{CO}_2$  y, así, reducir el consumo químico de  $\text{NaOH}$  (MSPS, 2009) (ver Figura 3.1).

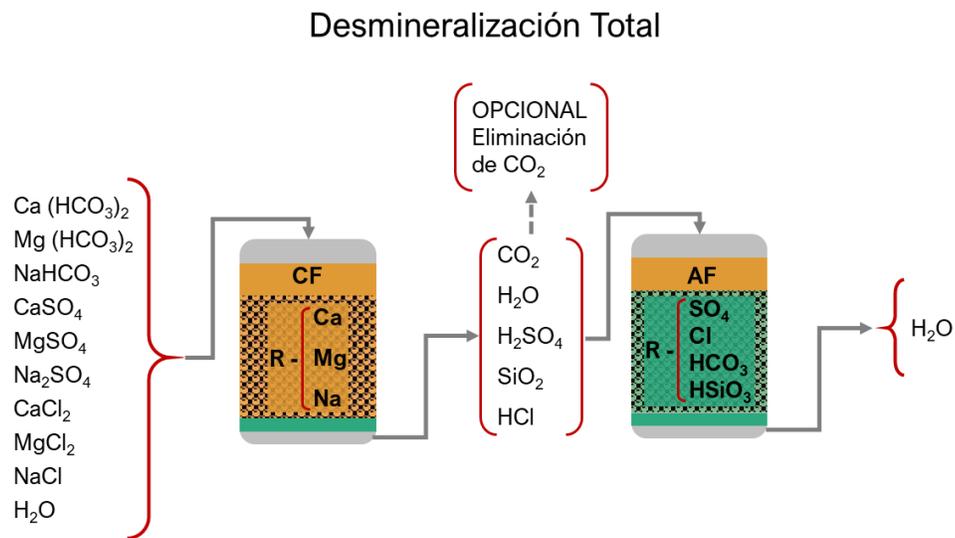


Figura 3.1. Proceso de desmineralización.

Fuente: Imagen tomada y adaptada de MSPS (2009, p. 92).

### b) Ósmosis Inversa (OI)

Las técnicas de separación por membranas se utilizan para filtrar impurezas diminutas, que serán retenidas de acuerdo con su tamaño y masa molecular. Estas técnicas se clasifican en

- microfiltración (MF): partículas de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-4</sup> mm
- ultrafiltración (UF): partículas de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-6</sup> mm
- nanofiltración (NF): partículas de 10<sup>-5</sup> a 10<sup>-6</sup> mm
- ósmosis inversa (OI): partículas de 10<sup>-6</sup> a 10<sup>-7</sup> mm
- electrodiálisis (ED): es un proceso de membrana cargada eléctricamente que remueve iones cargados menores (de 10<sup>-6</sup> a 10<sup>-7</sup> mm); es ineficaz para remover patógenos y partículas orgánicas (Kiely, 1999; Taylor & Wieser, 2002).

La ósmosis inversa (OI) es un método que se utiliza para reducir los sólidos disueltos de los suministros de agua. También reduce los iones cargados positiva y negativamente, pero de una manera diferente.

El proceso de ósmosis consiste en el desplazamiento neto de moléculas del disolvente (no de soluto), de la disolución más diluida a la más concentrada, a través de una membrana semipermeable. Al aplicar presión externa, el proceso se puede detener; y si la presión es aún mayor, el proceso se puede revertir, pasando el disolvente de la solución concentrada a la más diluida (Brown, LeMay, Bursten & Burdge, 2004).

En la OI, el agua es forzada a cruzar una membrana ejerciendo una presión de entre 3.4 y 69 bares, dejando las impurezas detrás, como se muestra en la Figura 3.2 (Lenntech, s.f.-a).

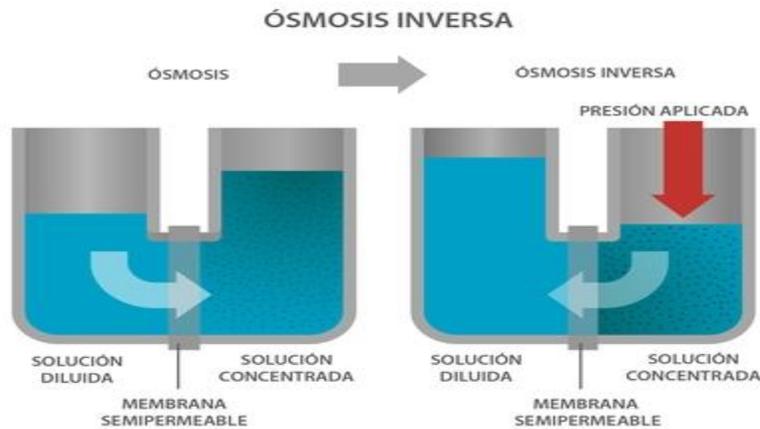


Figura 3.2. Proceso de ósmosis inversa

Fuente: Imagen tomada del Virtual Koshland Science Museum (s.f.).

Como resultado de este proceso se obtiene un agua producto —con una concentración de sales menor que la del agua de alimentación— y un subproducto de rechazo, la salmuera, con una elevada concentración de sales. Las dos corrientes de agua fluyen en paralelo entre las membranas: el agua producto se desala progresivamente, mientras que la salmuera se va concentrando también progresivamente.

La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y virus son separados del agua, permitiendo la eliminación de partículas tan pequeñas como los iones de una disolución.

La OI cumple con la mayoría de los estándares de agua con un sistema de un solo paso y los estándares más altos con un sistema de doble paso. Este proceso alcanza rechazos de hasta más de un 99.9% de virus, bacterias y pirógenos; es mucho más eficiente energéticamente que los procesos de cambio de fase (destilación) y más eficiente que los productos químicos fuertes requeridos para la regeneración de los procesos de II (Lenntech, s.f.-a).

Para evitar que las sales —sulfatos, carbonatos, fluoruro cálcico, sílice y óxidos metálicos— puedan precipitar al aumentar su concentración en el interior de las membranas, se utilizan productos antiincrustantes. Este tipo de sustancias actúa sobre la formación de cristales limitándolos al mantener los iones en sobresaturación en el agua concentrada (MSPS, 2009).

La separación de iones por medio de OI está asistida por partículas cargadas. Esto significa que es más probable que los iones disueltos que portan una carga, tales como las sales, sean rechazados por la membrana que aquellos que no estén cargados, tales como los compuestos orgánicos. Cuanto más grandes sean la carga y la partícula, mayor será la probabilidad de rechazo (Lenntech, s.f.-a).

Comparando ambos métodos, el II puede producir agua desmineralizada con una conductividad inferior a 0.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a partir de una simple combinación de una resina catiónica ácido fuerte (SAC) y una resina aniónica de base fuerte (SBA), y de menos de 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con la adición de una unidad SAC/SBA de lecho mixto. Ni aún en las plantas de OI más eficaces se puede obtener la calidad del agua tratada en una planta de II simple, y se requiere de una unidad de II posterior para lograr la calidad del agua de alimentación de la caldera (Purolite International, 2003).

## 3.2 Sistemas de alimentación de agua en la planta de ciclo combinado

### 3.2.1 Ciclo agua-vapor (ciclo vapor principal)

El propósito principal del ciclo consiste en tomar calor contenido en los gases de escape de la turbina de gas para transformar el agua del estado líquido al estado gaseoso (vapor) y viceversa.

Las bombas del tanque de alimentación impulsan el agua a través de la caldera; allí se evapora el agua, pasando el vapor sobrecalentado a la turbina, donde se realiza el trabajo mecánico por expansión del vapor. Luego pasa el condensador, que se encarga de transformar el vapor en condensado líquido.

El agua que circula en este sistema es agua desmineralizada. La obtención de esta agua se realiza por ablandamiento o desalación, como primer paso (si es requerido), y el afino, que consiste en eliminar las sales contenidas en el agua blanda o desalada a través de la desmineralización y la OI. Aguilar (1981) señala que la cantidad de agua que se pierde en el ciclo se debe a purgas, fugas de vapor y condensado, entre otras causas; y añade que, generalmente, el volumen que se repone varía de 1 a 5%.

### 3.2.2 Sistema de agua de enfriamiento

El propósito de este ciclo es rechazar el calor generado en el ciclo agua-vapor. Los componentes principales de este sistema son: el condensador, la torre de enfriamiento, tanque de alimentación, bomba de alimentación, desgasificador y la bomba del condensador (García et al., 2008).

De acuerdo con Aguilar (1981), para una planta termoeléctrica de 1,000 MW con un sistema de enfriamiento de un solo paso, los flujos de agua típicos para rechazo de calor en un condensador son de 35 y 70  $\text{m}^3/\text{s}$  para elevaciones de temperatura de 10 y 5°C, respectivamente.

En un sistema de enfriamiento de circuito cerrado, las pérdidas de agua son por evaporación, arrastre, filtraciones y purgas. Tomando como referencia el flujo total, estas pérdidas son de alrededor de 4 a 5 %, llegando a un máximo de 6 a 7% (Aguilar, 1981).

### 3.2.3 Sistema de humidificación de aire en compresor y/o cámara de combustión

De acuerdo con Ågren, Westermarck, Bartlett y Lindquist (2002), la humidificación del aire que entra a la cámara de combustión de la turbina de gas aumenta la eficiencia térmica del ciclo y, en

consecuencia, la potencia de salida de dicha turbina. La humidificación máxima absoluta que realiza es de 0.2 kg de agua por 1 kg de aire.

También, de acuerdo con lo mencionado por Ågren et al. (2002), en un ciclo completo de turbina de gas, la humidificación del aire comprimido provee un incremento del flujo másico dentro de la turbina, de aquí que aumente la potencia de salida. Se utiliza agua desmineralizada para evitar daños a la turbina de combustión.

### **3.2.4 Calidad del agua en los sistemas de alimentación**

La calidad del agua del sistema de alimentación de los ciclos de vapor principal y humidificación de aire en la turbina de gas se mide en diferentes puntos de interés (Aguilar, 1981). Para apreciar la calidad del agua, se considera lo siguiente (Aguilar, 1981; Ågren et al., 2002):

- dureza (contenido de calcio y magnesio, los cuales forman incrustaciones por calentamiento)
- alcalinidad
- materia en suspensión (lodos en caldera)
- gases disueltos (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>)
- dióxido de silicio (produce incrustaciones duras)
- fierro y cobre (ocasionan corrosión electroquímica)
- materia orgánica
- aceite
- pH (iones de hidrógeno), indica la alcalinidad o acidez del agua

El Anexo A muestra los parámetros de medición de la calidad del agua en el CAV y en el sistema de enfriamiento, así como los compuestos químicos que son aplicados para su control.

## 4 Metodología ACV

La determinación de los impactos ambientales mediante el ACV es un proceso iterativo, donde continuamente se están realizando ajustes en el objetivo, el alcance y en los límites del sistema. Esto ocurre conforme se va realizando la investigación y se va adecuando de acuerdo con la información disponible.

### 4.1 Objetivo y alcance del estudio

El objetivo de este estudio es determinar los impactos ambientales de una planta de ciclo combinado, con un enfoque en la calidad de agua y en los efectos que tienen los químicos empleados para su acondicionamiento.

Se examinó la información de diciembre de 2014 a octubre de 2015, seleccionando el mes de diciembre por reportar el mayor consumo de agua. El ACV se realizó considerando los lineamientos de las Normas ISO 14040 y 14044 (IMNC, 2008a, 2008b).

Se estableció como unidad funcional 1 MWh de energía eléctrica producida en la planta de ciclo combinado, y se utilizó la misma unidad para el flujo de referencia.

#### 4.1.1 Descripción del sistema

El sistema-producto involucra una unidad de generación de energía eléctrica (GEE), bajo la tecnología de ciclo combinado que produce mensualmente 141,271.2 MWh. Cabe mencionar que la unidad en estudio pertenece a una central que cuenta con otra unidad similar.

Los componentes del sistema-producto incluyen una planta de tratamiento de agua desmineralizada, turbina de gas, caldera recuperadora de calor-generadora de vapor, turbina de vapor y torre de enfriamiento. Estas subunidades se comunican entre sí, de tal forma que las salidas de un proceso son las entradas de otro.

#### 4.1.2 Límites del sistema

Este estudio es «de la cuna a la puerta» y excluye la construcción y el desmantelamiento de la planta, así como la transmisión y la distribución de la energía.

Para la evaluación de los impactos ambientales se consideran los siguientes procesos:

- *Upstream*: procesos de fabricación de los materiales y la extracción, procesamiento y distribución del combustible.
- Sistema del proceso de GEE: materiales para la operación y mantenimiento de la planta; combustión, emisiones al aire, descargas al agua y los residuos del proceso.
- *Downstream*: tratamiento de desechos y residuos.

## 4.2 Análisis de inventario

### 4.2.1 Condiciones de operación de la planta de ciclo combinado

Las condiciones de operación de la planta de ciclo combinado (CC) fueron las siguientes:

- El combustible es gas natural.
- Se produce agua desmineralizada mediante dos tratamientos: OI e II. Los efluentes del sistema de OI se utilizan en el sistema de enfriamiento; los del sistema de II, en el ciclo agua-vapor.
- La planta objeto de este estudio es una unidad relativamente nueva (repotenciada), por ello se consideró un factor de planta del 100% y no del 92%, que es el factor al cual normalmente operan.
- El suministro de agua proviene de pozo, por lo que no requiere pretratamiento.
- El análisis está basado en la potencia bruta.

La Tabla 4.1 presenta las características de operación de la planta; la Tabla 4.2, la composición del gas natural.

Tabla 4.1  
Características de operación de la planta de CC

Condiciones de operación	Cantidad	Unidad
Potencia Bruta	196.21	MW
Eficiencia eléctrica bruta	52.67	%
Eficiencia eléctrica neta	51.13	%
Tasa de calor bruta (heat rate)	7,041	kJ/kWh
Tasa de calor neta	6, 836	kJ/kWh
Consumo diario de combustible	38,000,000	ft <sup>3</sup> /día
	1, 076,046	m <sup>3</sup> /día
Usos propios de energía	2.92	%
Tiempo de vida de la planta en años	25	años
Producción de electricidad	141,271.2	MWh/mes

Cabe señalar que normalmente los estudios hacen referencia a períodos de un año; sin embargo, se consideró la producción de electricidad mensual porque la información obtenida fue mensual.

En el Anexo C se muestran los detalles del esquema de planta evaluado y su respectivo balance de masa y energía.

Tabla 4.2  
Composición del gas natural

Elemento/Compuesto	Símbolo	Volumen (%)
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0.36
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.07
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	3.61
Monóxido de carbono	CO	0.09
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.34
Metano	CH <sub>4</sub>	87.00
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.46
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.03
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0.04
Total		100.00

Combustible: temperatura inicial de 25°C

#### 4.2.2 Identificación de entradas y salidas de los materiales del inventario

En esta sección, las entradas (materia prima y energía) y salidas (productos, subproductos, emisiones al aire, descargas al agua y desechos al suelo) de los principales componentes de la unidad de CC se representan por medio de cajas negras. Las entradas principales y secundarias se indican con flechas grises; las salidas principales y secundarias, con flechas rojas.

En la Figura 4.1 se muestran las entradas/salidas principales que intervienen directamente en el proceso de generación y las entradas/salidas secundarias que corresponden a los procesos auxiliares.

De acuerdo con García et al. (2008), las entradas principales son:

- el gas natural, que es el combustible principal de la turbina de gas,
- el aire, que proporciona el oxígeno necesario para la combustión,
- el propano o butano, que es el combustible utilizado para el arranque por su mayor poder calorífico, y
- el agua, que es utilizada en los diferentes procesos.

Las salidas principales comprenden la electricidad, gases de escape, vapores y calor que se genera durante el proceso.

Con respecto a las entradas secundarias, éstas incluyen el aceite para la lubricación y refrigeración de los equipos, diversos productos químicos para el tratamiento de los diferentes tipos de agua para la planta, el suministro de electricidad para períodos previos al arranque y para los sistemas auxiliares, y el aire para la instrumentación.

Las salidas secundarias se derivan del sistema de enfriamiento y del proceso de GEE e incluyen las aguas residuales, las emisiones de gases y los residuos sólidos.

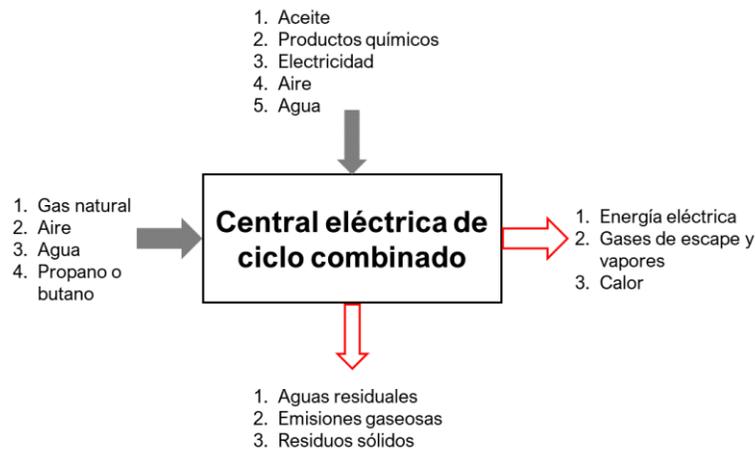


Figura 4.1. Entradas/salidas principales y secundarias de la unidad de ciclo combinado

En las Figuras 4.2 a 4.9 se muestran las entradas principales y secundarias, así como las correspondientes salidas, de los principales componentes de la unidad de CC de acuerdo con García et al. (2008).

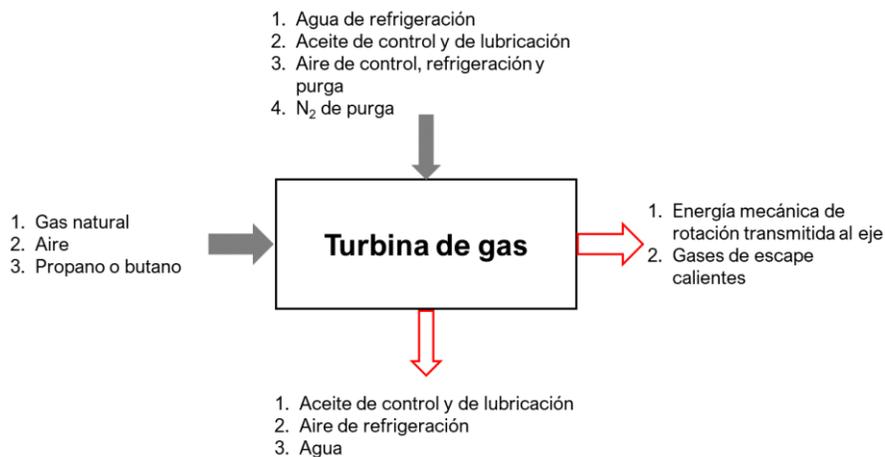


Figura 4.2. Entradas/Salidas de la turbina de gas

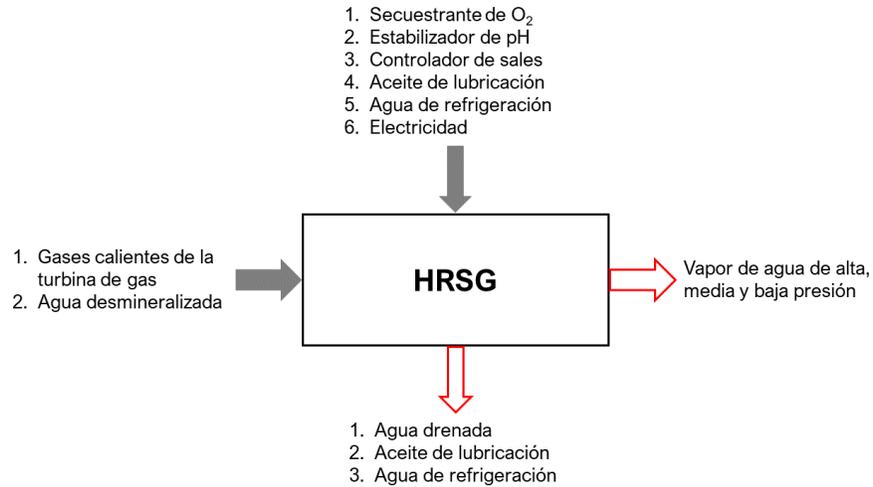


Figura 4.3. Entradas/salidas de la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor (HRSG)

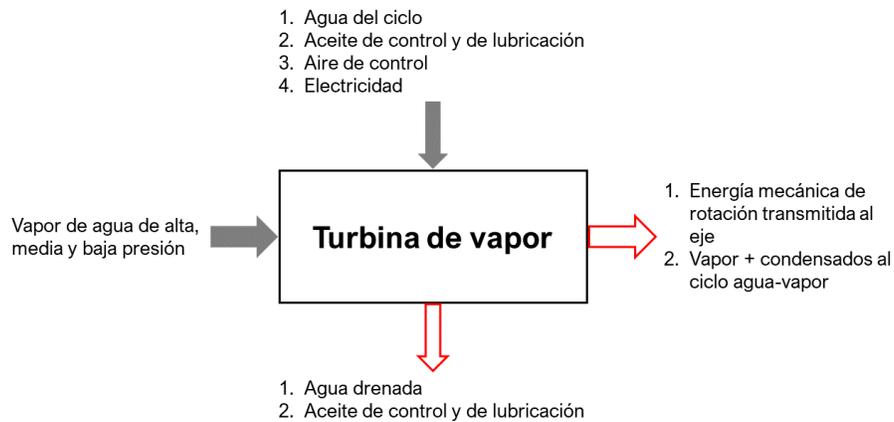


Figura 4.4. Entradas/salidas de la turbina de vapor.

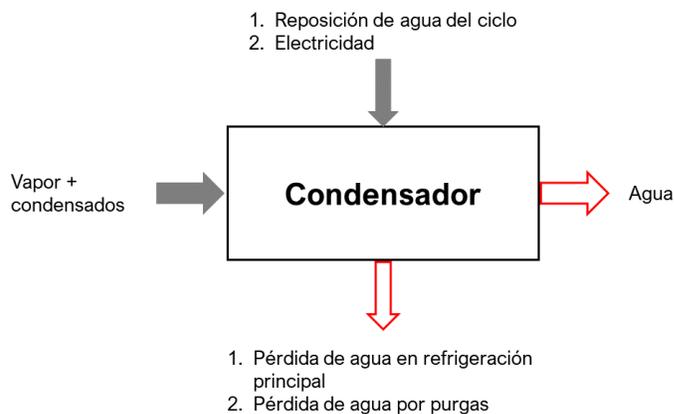


Figura 4.5. Entradas/salidas del condensador



Figura 4.6. Entradas/salidas del tanque de alimentación

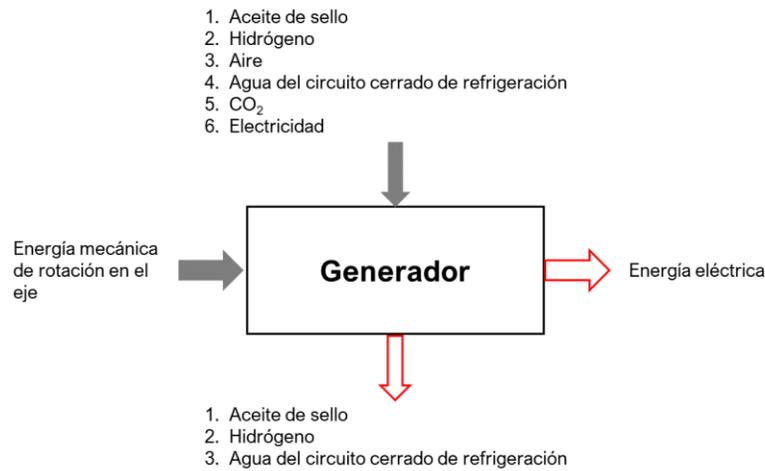


Figura 4.7. Entradas/salidas del generador eléctrico

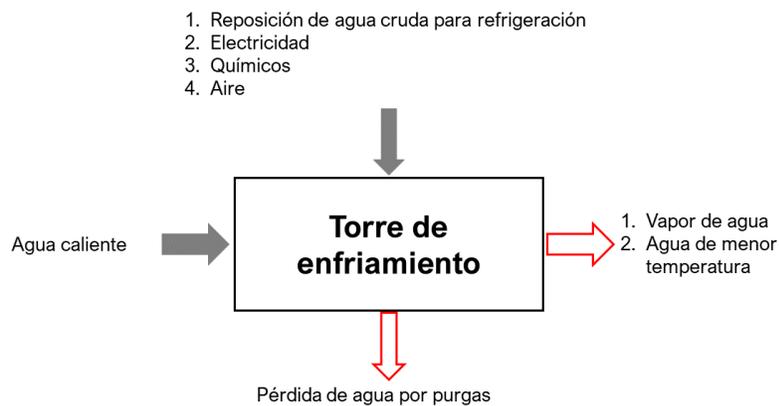


Figura 4.8. Entradas/salidas de la torre de enfriamiento

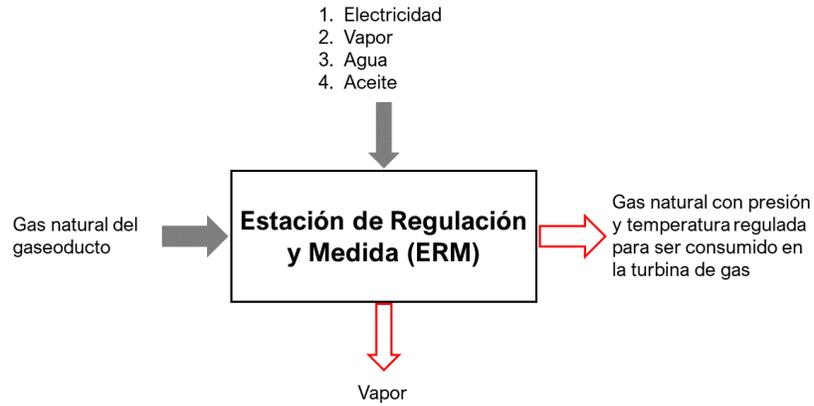


Figura 4.9. Entradas/salidas de la estación de regulación y medida (ERM)

El agua desmineralizada se produce mediante OI e II. Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las entradas y salidas correspondientes a estos tratamientos.

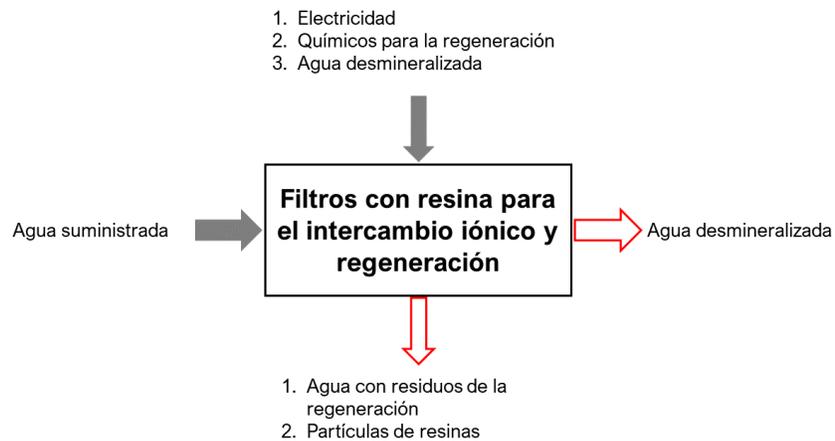


Figura 4.10. Entradas/salidas del tratamiento mediante intercambio iónico.

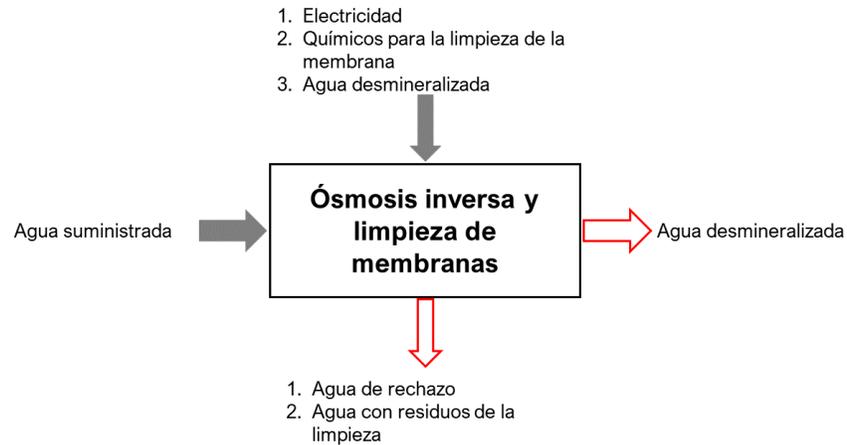


Figura 4.11. Entradas/salidas del tratamiento mediante ósmosis inversa

### 4.2.3 Diagrama de bloques del proceso de GEE en la unidad de CC

Una vez identificadas las entradas y salidas de los componentes principales de la unidad de CC, se elaboró el diagrama de bloques que se presenta en la Figura 4.12.

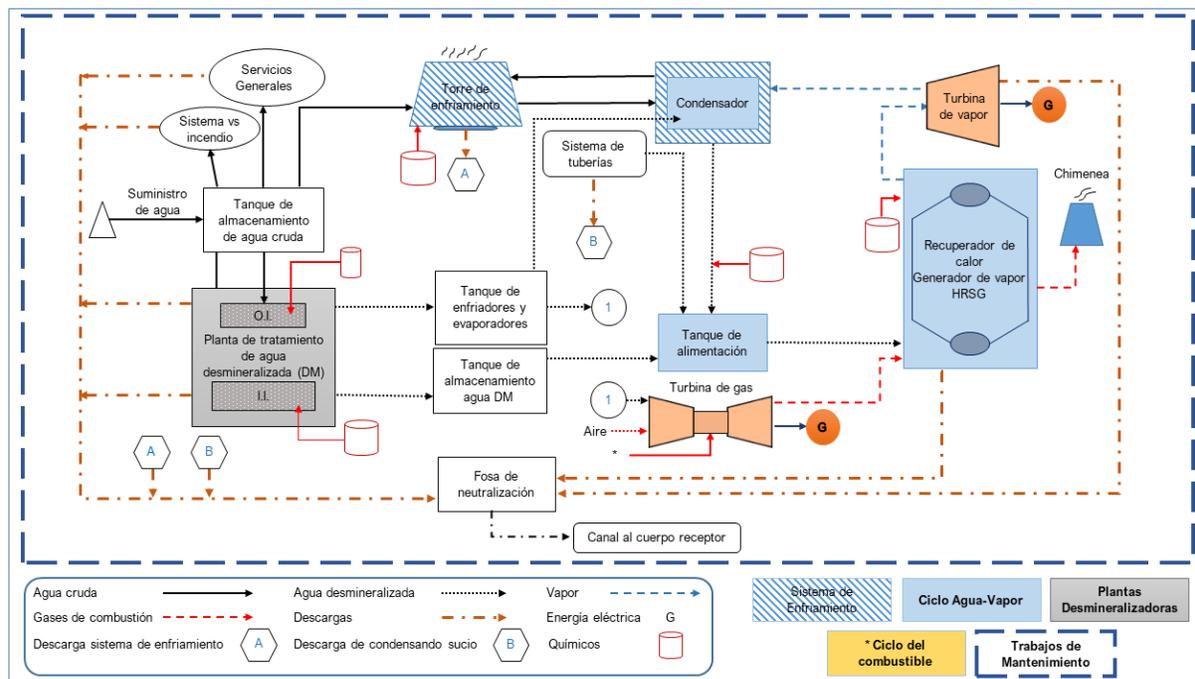


Figura 4.12. Diagrama de bloques del proceso de generación de energía eléctrica de la planta de CC.

Los químicos para acondicionamiento de agua se utilizan en las plantas de tratamiento de agua desmineralizada (DM), la torre de enfriamiento y el ciclo agua-vapor. Los trabajos de mantenimiento abarcan los materiales para el mantenimiento de la unidad.

#### 4.2.4 Recopilación de información y tratamiento de datos faltantes

La representación gráfica de las entradas y salidas de cada uno de los componentes principales de la unidad de CC facilitó la determinación del tipo de información requerida para la elaboración del inventario.

Los materiales que lo componen están relacionados con el recurso agua: químicos empleados, consumos de agua y descargas. Además, en lo que se refiere a los químicos, se consideraron no solo los de mayor consumo en los procesos y actividades realizadas, sino también aquellos de mayor toxicidad, aun cuando su consumo fuera menor comparado con el de otros.

La procedencia de los datos fue de dos tipos:

##### a) *Directos*

Esta información fue proporcionada por los ingenieros de la planta (personal responsable de la operación de la planta) e incluye el consumo de combustible y su composición, los compuestos químicos y cantidades empleadas en los subprocesos, el volumen de agua consumido y descargado, así como las condiciones de operación de la planta, los datos correspondientes al mantenimiento y la disposición de los residuos.

##### b) *Indirectos*

Esta información abarca datos sobre la extracción, el procesamiento y transporte del combustible, la producción de materiales y el tratamiento de residuos, entre otros.

Para recopilar esta información, fue necesario

- hacer estimaciones teniendo como base la información proporcionada por el personal de la planta
- obtener datos de otras plantas bajo la misma tecnología y configuración, y hacer asignaciones de acuerdo con la unidad funcional establecida para este estudio
- recabar información de fuentes bibliográficas especializadas: artículos, libros, tesis sobre plantas de CC y manifiestos de impacto ambiental reportados a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), tales como los elaborados por el Instituto de Ecología (IE) y la CFE (2003) y la Universidad Autónoma de Tamaulipas (s.f.).
- hacer uso de la base de datos ecoinvent, disponible en el software SimaPro (v. 8.0.4.30; PRé Consultants, 2014).

#### 4.2.5 Consideraciones generales

- Los datos sobre materiales, procesos externos y energía obtenidos de la base de ecoinvent se adecuaron al mix eléctrico mexicano.
- Se consideraron las cantidades mensuales consumidas de los compuestos químicos empleados en la torre de enfriamiento, tratamiento de agua y ciclo agua-vapor.

- Dado que el ACV se enfoca en consumos y acondicionamiento de agua, se realizó un balance de agua de entradas y salidas, cuidando de no duplicar cantidades en el sistema de tratamiento de agua desmineralizada. Los resultados de este balance se encuentran en el Anexo C, en el apartado de sistemas auxiliares.

#### 4.2.6 Consideraciones específicas

##### a) Materiales

- La asignación de los materiales para la operación y mantenimiento se efectuó en masa, considerando la producción de energía del mes atípico de estudio (diciembre de 2014) y realizando la transformación de unidades de acuerdo con los data set de las bases de datos de la herramienta SimaPro (v. 8.0.4.30; PRé Consultants, 2014).

##### b) Volumen de agua requerida para el sistema

- Los datos de volumen y calidad de agua de entrada y salida, y el volumen utilizado en cada proceso y área de consumo fueron proporcionados por el personal de la planta.
- El volumen de agua desmineralizada (DM) producida en ambos tratamientos fue estimado de acuerdo con las condiciones de operación y flujos de entrada de agua a la planta de tratamiento.
- Se consideró el agua empleada para las pruebas del sistema contra incendio y la de servicios generales de la planta (áreas verdes y oficinas).
- La cantidad de agua desmineralizada para el sistema de enfriamiento de la turbina de gas es de 0.0546 kg de agua por MJ de combustible.

##### c) Tratamiento de Intercambio Iónico (II)

- El sistema de tratamiento de II utiliza resinas catiónicas y aniónicas fuertes, y comprende dos trenes de tratamiento. Cada tren está integrado por un filtro con resina catiónica, otro filtro con resina aniónica y un tercer filtro de lecho mixto (mitad catiónica y mitad aniónica).
- El flujo de entrada promedio en el tren de tratamiento de resinas es de 15 m<sup>3</sup>/h o 360 m<sup>3</sup>/día. De los 360 m<sup>3</sup> de agua DM producida, 14 m<sup>3</sup> se ocupan para la regeneración, y el resto va al tanque de almacenamiento.
- Los filtros catiónico y aniónico se regeneran cada 24 horas; y el de lecho mixto, cada mes o 1,400 m<sup>3</sup>, dependiendo de la producción de agua DM, y ocupa 7.08 m<sup>3</sup> de agua DM para su regeneración.
- El tiempo de vida de las resinas es de aproximadamente siete años y se considera que son de importación.

- El volumen de la resina empleada en cada filtro se calculó tomando en cuenta el volumen de agua filtrado, el tipo de resinas, el tiempo de regeneración y la composición del tren de tratamiento, de acuerdo con el cálculo realizado en Feliciano & Martínez (1977).
- Los compuestos químicos empleados para la regeneración de las resinas son el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido de sodio (NaOH).

#### d) *Tratamiento de Ósmosis Inversa (OI)*

- Las membranas están constituidas de poliamida.
- El flujo de entrada promedio al proceso es de  $21 \text{ m}^3/\text{h}$  con un 25% de rechazo. Sin embargo, para el mes de estudio, se calculó un flujo de entrada de  $10.96 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- La solución antiincrustante de las membranas es de fosfonatos a 7 ppm.
- El filtro mixto se regenera mensualmente.
- El volumen de agua para el lavado de las membranas no se obtuvo porque el tratamiento de OI se realizaba de forma intermitente.

#### e) *Descargas*

- No fue posible obtener un análisis de la calidad de agua de los procesos intermedios (purgas de la torre de enfriamiento, de la caldera y de la planta de tratamiento de agua).
- Para completar el ACV referente a las descargas de los subprocesos, éstos se obtuvieron de otra unidad termoelectrónica bajo la misma tecnología, que contaba con el mismo sistema de enfriamiento y cuyo tratamiento de agua DM se efectuaba por II.
- El agua que contiene grasas y aceites pasa a un tanque, en donde se separan por decantación. El aceite se almacena en unos tambos que posteriormente son recolectados por una compañía externa encargada de disponer este tipo de residuos de forma adecuada.

#### f) *Energía eléctrica*

- No se considera la energía eléctrica empleada en cada proceso y área de la planta, ya que es generada por la misma.
- Se consideró el autoconsumo en la producción de energía eléctrica mensual, por eso se tomó en cuenta la potencia bruta.

#### g) *Combustible*

- Dentro del ciclo de vida del combustible, se consideran las etapas de extracción, transporte, acondicionamiento y almacenaje del combustible, la combustión y las emisiones del gas natural.
- El modelo de combustión está integrado por el consumo de gas natural, la cantidad de aire empleada para la combustión y las emisiones de gases. Después de realizar los cálculos

para obtener estos datos, los resultados fueron validados a través de un balance de masa y energía elaborado mediante la herramienta informática THERMOFLEX® (v. 28; Thermoflow Inc.). Los resultados del balance se presentan en el Anexo C.

- Las emisiones al aire (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) generadas durante la combustión del gas natural fueron calculadas de acuerdo con las fórmulas empleadas en Tan et al., (2010) y los factores de emisión de la EPA (1995).
- La cantidad de gas natural empleado en la unidad de ciclo combinado se calculó en kg/MWh de acuerdo con la metodología propuesta en Tan et al. (2010).
- La cantidad de aire para la combustión del gas natural fue de 11.2279 kg por m<sup>3</sup> de combustible —esta información fue proporcionada por la planta.
- El gas natural es importado (United States Energy Information Administration [EIA], 2017) y llega al Golfo de México. El transporte del combustible se toma desde este punto hasta la unidad en estudio, que se encuentra en el centro del país (SENER, 2015).
- Los flujos intermedios que se generan en la combustión, los gases de combustión y el vapor de agua no se consideran en el inventario. Los gases de combustión son utilizados para transformar el agua en vapor, y éste es utilizado para realizar el trabajo mecánico en la generación de energía. El vapor de agua residual tampoco se considera porque se condensa.

#### 4.2.7 Cálculo de la cantidad de combustible

Para calcular la cantidad de combustible utilizado en la planta en kg por MWh y las emisiones generadas por la combustión (kg de contaminante), se tomó como base la información presentada en el artículo de Tan et al. (2010), considerando para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> los factores de emisión presentados por la EPA (1995).

Las fórmulas empleadas son las que se presentan a continuación:

Para calcular la cantidad de combustible requerido se utilizó la fórmula (1):

$$Combustible (kg) = \frac{1}{valor\ calorífico} \cdot \frac{MWh}{\frac{MJ}{kg}} \cdot \frac{1}{eficiencia\ térmica} \cdot 3600 \frac{MJ}{MWh} \quad (1)$$

Para el cálculo de cada una de las emisiones producidas por la combustión, se empleó la siguiente fórmula genérica (2), utilizando el respectivo factor de emisión de cada contaminante:

$$Contaminante \left( \frac{kg}{MWh} \right) = \frac{Factor\ de\ emisión \left( \frac{kg}{m^3} \right)}{10^6} \cdot Combustible \left( \frac{m^3}{MWh} \right) \quad (2)$$

Para la obtención de la emisión por CO<sub>2</sub>, se utiliza la siguiente fórmula (3):

$$kg \text{ de } CO_2 = 3.67 \left( \frac{kg \text{ } CO_2}{m^3} \right) \cdot (CON) \cdot (\text{fracción C}) \cdot (d) \cdot x(m^3 \text{ gas}) \quad (3)$$

Donde

CON = fracción de carbón que tiene el combustible y que se transforma en CO<sub>2</sub> (se asume el 100%)

fracción C = proporción de C en el gas natural = 0.76

d = densidad del gas natural = 0.672 kg/m<sup>3</sup>

x = m<sup>3</sup> de gas

Los resultados se muestran en el Capítulo 5.

#### 4.2.8 Supuestos

- Para el transporte de los materiales (estopa, lubricante, hipoclorito de sodio, etc.), se asume que los proveedores de la mayoría de los consumibles provienen de la ciudad más cercana.
- De la información contenida en los Manifiestos de Impacto Ambiental presentados a SEMARNAT por la CFE (IE & CFE, 2003) se obtienen los datos sobre los posibles residuos producidos durante la operación. Estos datos sirvieron de base para obtener las entradas de materiales consumibles para el mantenimiento.
- La eliminación de las resinas gastadas en el tratamiento de II se realiza mediante incineración municipal.
- Se considera que los residuos peligrosos de los trabajos de mantenimiento son incinerados.

### 4.3 Evaluación del impacto

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) se realizó mediante la herramienta informática SimaPro v. 8.0.4.30 —System for Integrated environmental Assessment for Products—, desarrollada por PRé Consultants, y la base de datos ecoinvent.

Se eligió la metodología ReCiPe, considerando las categorías de impacto intermedias (*midpoint*) y la perspectiva jerárquica (H). Se seleccionó este método porque toma las consideraciones de los modelos científicos aceptados y validados, con valores normalizados del mundo (excluye Europa) y cumple con las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Además, esta metodología es considerada como la más completa porque incluye el mayor número de categorías de impacto de punto medio (18); los factores, modelos de caracterización e indicadores son los más recientes y armonizados para la evaluación del impacto del ciclo de vida.

Los resultados de la EICV y su interpretación se presentan en el artículo publicado (Ferat Toscano et al., 2019).

## 5 Impactos ambientales determinados

Los resultados del ACV muestran, como era de esperarse, una contribución significativa del ciclo de combustible al impacto ambiental, seguido por el consumo de agua; estas contribuciones se deben a la cantidad de gas natural empleado y al volumen de agua extraído, respectivamente. Además, se obtuvo una aproximación de los impactos potenciales ocasionados por los compuestos químicos utilizados para el acondicionamiento de agua y los materiales empleados en el mantenimiento. La contribución de los compuestos químicos es relevante debido a que se considera su producción —incluyendo la extracción de los materiales para su manufactura.

Sin embargo, la evaluación del impacto tiene algunas limitaciones. Fue posible determinar los efectos que ocasionan los compuestos inorgánicos por su producción y toxicidad, pero para los compuestos orgánicos, solo hay factores de caracterización que permiten determinar los impactos por su producción.

Se identificó que gran parte de los compuestos empleados tiene características tóxicas; sin embargo, estos compuestos no se determinan en los estudios de calidad de agua debido a que no se encuentran dentro de la lista de compuestos evaluados por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Por esta razón, se desconoce cuál es su impacto al medio ambiente y, por lo tanto, podrían ser considerados como contaminantes emergentes. Becerril señala que los contaminantes emergentes son «contaminantes no regulados que pueden ser candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia» (Becerril, 2009). Además, agrega que no es necesario que estos contaminantes persistan en el ambiente para causar efectos negativos.

Aunque estos contaminantes puedan estar presente a niveles traza en las descargas —como residuos de los compuestos, en forma degradada o unidos a otros compuestos—, en su conjunto pueden llegar a superar a los compuestos químicos que se presentan en niveles más elevados (Daughton, 2004).

En este capítulo se hace un análisis de las emisiones al aire por el consumo del combustible y las descargas de la planta en estudio. Se comparan los resultados de calidad del agua entregados por la planta (agua de entrada y salida de la planta) con los valores límite establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996a); se presentan los resultados de toxicidad de los compuestos químicos empleados en el acondicionamiento del agua y que podrían estar presentes en la descarga; y se señalan los problemas potenciales causados por un exceso de salinidad de las aguas residuales.

### 5.1 Consumo de combustible y emisiones a la atmósfera

La cantidad de combustible empleado es la base para determinar las emisiones a la atmósfera. Una variación en la cantidad consumida puede ser o no significativa en el impacto al ambiente. Para conocer el efecto de esta variación, se comparó la cantidad real de combustible empleado en la unidad de estudio con una cantidad estimada y se calcularon las emisiones producidas para ambos valores.

Para obtener los datos teóricos de la cantidad de combustible y de las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, se utilizaron las fórmulas expresadas en Tan et al. (2010) (ver Sección 4.2.7). El consumo de combustible real fue proporcionado por el personal de la planta. La variación entre la cantidad teórica y la real puede deberse a diversos factores, entre ellos, el valor del poder calorífico del combustible que se consideró en el cálculo, la eficiencia térmica y/o la densidad del combustible considerado (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1

Resultados del cálculo de la cantidad de combustible y emisiones producidas por la combustión: valores teóricos y reales

	Valor teórico	Valor real
<b>Combustible empleado</b>		
cantidad de gas natural (kg/MWh)	133.5543	
cantidad de gas natural (m <sup>3</sup> /MWh)	198.74	218
<b>Contaminantes metodología EPA</b>		
	<b>kg de contaminante / por MWh</b>	
	kg de SO <sub>2</sub>	0.0019
	kg de NO <sub>x</sub>	0.541
	kg de CO <sub>2</sub>	372.51
	kg de CH <sub>4</sub>	0.007

La diferencia entre el valor real y el estimado es de casi 20 m<sup>3</sup> de combustible por MWh producido. Esta variación de casi un 10% se ve reflejada también en la cantidad de los gases emitidos.

Con respecto al CO<sub>2</sub>, hay una diferencia de 37.49 kg entre el valor estimado y el valor real; en lo que se refiere al resto de los gases emitidos, las diferencias se presentan en el orden de centésimas y milésimas. Las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen un mayor impacto en el ambiente, comparadas con las del resto de los gases. Sin embargo, si consideramos los MWh producidos a nivel nacional, los efectos de estas emisiones atmosféricas podrían ser significativos para el medio ambiente y la salud humana, como se verá a continuación.

### 5.1.1 Gases efecto invernadero (GEI)

Como resultado de las actividades humanas, se producen emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero —CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O— y de un grupo de gases fluorados que incluye los perfluorocarbonos (PFC), los hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (EPA, 2017).

Al almacenarse la energía de la radiación solar en la atmósfera, los gases de invernadero calientan el planeta de manera importante, creando condiciones más propicias para la vida. Sin embargo, cuando las concentraciones de estos gases aumentan más allá de los niveles naturales como consecuencia de las actividades humanas, la capacidad de la atmósfera para absorber la energía de la radiación solar aumenta, lo que eleva la temperatura promedio global. Estos cambios afectan los patrones climáticos globales ocasionando la elevación de los niveles del mar, la destrucción de

hábitats de animales y plantas, mayor frecuencia y severidad de tormentas, derretimiento de los glaciares y aumento de sequías (Reyes Hernández & Castillo Forero, 2017).

En México, en el 2015, el total de emisiones de GEI fue de 699,564.3 Gg de CO<sub>2</sub> eq., de los cuales 497,483.99 Gg de CO<sub>2</sub> eq. (71.11%) correspondieron al sector de energía y, dentro de este sector, la producción de electricidad y calor contribuyó con 141,729.59 Gg de CO<sub>2</sub> eq. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] & SEMARNAT, 2018).

#### *a) Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)*

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) está presente naturalmente en la atmósfera en niveles de aproximadamente 0.035%.

Pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> se producen durante el metabolismo celular: está presente en la sangre como CO<sub>2</sub> disuelto, ácido carbónico y el ion bicarbonato. La mayoría de CO<sub>2</sub> es excretado del cuerpo en el aire exhalado (Recurso Nacional Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional, s.f.-a).

La concentración de CO<sub>2</sub> al aire libre oscila entre 360 ppm en áreas de aire limpio y 700 ppm en las ciudades. El valor máximo recomendado para los interiores es de 1,000 ppm, y el valor límite para oficinas es de 1,500 ppm (PCE Instruments, s.f.).

No se han reportado efectos nocivos relacionados con la exposición a corto plazo de CO<sub>2</sub> a niveles por debajo del 2% (20,000 ppm); sin embargo, concentraciones más altas pueden afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central: el CO<sub>2</sub> produce el desplazamiento del O<sub>2</sub>, y en concentraciones mayores a 30,000 ppm puede producir asfixia (Instituto para la Salud Geoambiental, s.f.).

El CO<sub>2</sub> gaseoso no es irritante para la piel; sin embargo, el contacto con CO<sub>2</sub> líquido puede provocar congelamiento.

#### *b) Metano (CH<sub>4</sub>)*

Es el principal compuesto de la mezcla de gases que conforma al gas natural. Las principales fuentes emisoras de metano son la agricultura (42.3%), la energía (29.4%) y los desechos (27.7%).

El metano, junto con el carbono negro, el ozono troposférico y algunos hidrofluorocarbonos — todos estos conocidos como CCVC (forzadores climáticos de vida corta)— tiene efectos importantes sobre el clima. Su tiempo de vida media en la atmósfera es más corto con respecto al del CO<sub>2</sub>, y sus efectos se relacionan, entre otros, con enfermedades cardiovasculares y respiratorias (INECC & SEMARNAT, 2015).

El metano se encuentra citado como sustancia peligrosa por organismos como la EPA, la NFPA y la ACGIH y está incluido en la lista de sustancias extremadamente peligrosas para la salud (New Jersey Department of Health, s.f.). El límite de exposición laboral o valor límite umbral (TLV) recomendado por la ACGIH es de 1,000 ppm como promedio durante un turno laboral de 8 horas.

Las emisiones de metano a nivel nacional en 2015 equivalieron al 20.32% (142,143.76 Gg de CO<sub>2</sub> eq.) del total de emisiones de GEI (INECC & SEMARNAT, 2018).

### c) Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

El término «óxidos de nitrógeno» (NO<sub>x</sub>) se utiliza para referirse a una familia de compuestos que incluyen el óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). El óxido nítrico es un gas incoloro e inflamable, de olor ligero; el dióxido de nitrógeno es de color rojizo-marrón y de olor penetrante; y el óxido nitroso es un gas incoloro y soluble en agua (Aeroqual, 2020; EPA, 1999).

Estos gases se producen a partir de la reacción del nitrógeno y oxígeno presentes en el aire durante la combustión a altas temperaturas; también son producidos naturalmente por la acción de microorganismos en fertilizantes nitrogenados, incendios forestales y tormentas eléctricas (Aeroqual, 2020).

Los gases NO<sub>x</sub> reaccionan para formar smog y lluvia ácida, y juegan un papel central en la formación de material particulado y ozono a nivel del suelo, los cuales están asociados con efectos nocivos para la salud (Icopal, s.f.).

La deposición atmosférica del nitrógeno derivado de los NO<sub>x</sub> y otros compuestos que lo contienen contribuye a la eutrofización de vías fluviales y estuarios costeros. La eutrofización es el resultado de un aumento en la acumulación de nutrientes en un cuerpo de agua. Esto produce la proliferación de algas, lo que puede reducir o eliminar el oxígeno disponible para otras plantas y animales acuáticos.

Además, niveles elevados de NO<sub>x</sub> pueden tener efectos negativos en la vegetación, incluyendo el deterioro de las hojas y la disminución del crecimiento, y pueden hacer la vegetación más susceptible a las enfermedades y a las heladas (Icopal, s.f.).

El aumento progresivo a la exposición al NO<sub>2</sub> puede producir problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar.

Para proteger la salud de la población, la concentración de NO<sub>2</sub>, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm, o lo que equivale a 395 µg/m<sup>3</sup>, en una hora una vez al año (SEMARNAT, 2019).

Por otra parte, el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es un gas que se deriva de las actividades agrícolas e industriales, la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos, y el tratamiento de aguas residuales. El impacto en el calentamiento global de un kilogramo de N<sub>2</sub>O es 300 veces mayor al generado por un kilogramo de CO<sub>2</sub> (EPA, 2017).

En el 2015, las emisiones nacionales de N<sub>2</sub>O derivadas de la producción de electricidad y calor constituyeron 292.98 Gg de CO<sub>2</sub> eq. (INECC & SEMARNAT, 2018).

#### d) Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Este compuesto no se encuentra dentro del grupo de gases de efecto invernadero. Sin embargo, pertenece a la categoría de gases denominados precursores de ozono (INECC & SEMARNAT, 2012).

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se genera como emisión tanto de fuentes naturales —volcanes y actividad geotérmica— como de la combustión de compuestos ricos en azufre (Secretaría de Salud, 2010). Comparado con el petróleo y el carbón, el gas natural es una fuente relativamente menor de SO<sub>2</sub>.

Las emisiones de SO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas reaccionan con otras sustancias químicas en la atmósfera para formar partículas de sulfato, las cuales contribuyen de manera importante a la mezcla de partículas finas que circulan en el aire que respiramos.

El SO<sub>2</sub> causa irritación e inflamación aguda o crónica de las mucosas conjuntival y respiratoria; por su parte, las partículas finas han sido relacionadas con varios problemas serios de salud, en particular en niños, adultos mayores e individuos que padecen enfermedades crónicas cardiovasculares y pulmonares (CCA, 2011; SEMARNAT, 2019).

De acuerdo con lo establecido por la Secretaría de Salud (2010), los límites normados máximos de concentración de SO<sub>2</sub> como contaminante atmosférico son:

- 288 µg/m<sup>3</sup> o 0.110 ppm promedio en 24 h, una vez al año
- 66 µg/m<sup>3</sup> o 0.025 ppm promedio anual
- 524 µg/m<sup>3</sup> o 0.200 ppm promedio en 8 h para no ser rebasado dos veces al año

En la atmósfera, las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos procedentes de la industria, transporte, vivienda y producción de energía se convierten en partículas de sulfatos y nitratos que, al combinarse con el vapor de agua y la radiación solar, se transforman en ácido sulfúrico o nítrico suaves. Estos ácidos retornan a la tierra en diferentes formas (rocío, llovizna o lluvia) (Kiely, 1999). La lluvia ácida puede ocasionar daños a peces y otras formas de vida acuática, bosques, cosechas, metales y estructuras.

## 5.2 Consumo y calidad de agua

### 5.2.1 Consumo de agua

De los impactos detectados durante el ACV, el consumo de agua ocupa el segundo lugar después del ciclo del combustible.

Durante el período de diciembre 2014 a octubre 2015, en promedio, el volumen del agua de pozo que se suministró al proceso fue de 212,119 m<sup>3</sup> mensuales, los cuales se distribuyeron de la siguiente manera: el 89.68 % (190, 234 m<sup>3</sup>) se utilizó para repuesto en el sistema de enfriamiento (torre húmeda) —aproximadamente, 2/3 partes del agua que entra de repuesto en el sistema de enfriamiento se pierde por evaporación y 1/3 sale por purgas del sistema—, un 9.36% entró al

sistema de tratamiento de agua DM (OI e II) y menos del 1% restante se utilizó como consumo fijo para servicios generales (áreas administrativas y para pruebas de funcionamiento del sistema contra incendio).

La Figura 5.1 muestra la asignación del agua de pozo (influyente) a las áreas destino (sistema de enfriamiento, tratamiento DM y servicios generales) mencionadas anteriormente. Las salidas de agua corresponden a la evaporación efectuada en la torre y a las descargas de la planta durante el período de evaluación.

Como se ha mencionado, gran parte del agua requerida en el proceso es utilizada para el sistema de enfriamiento.

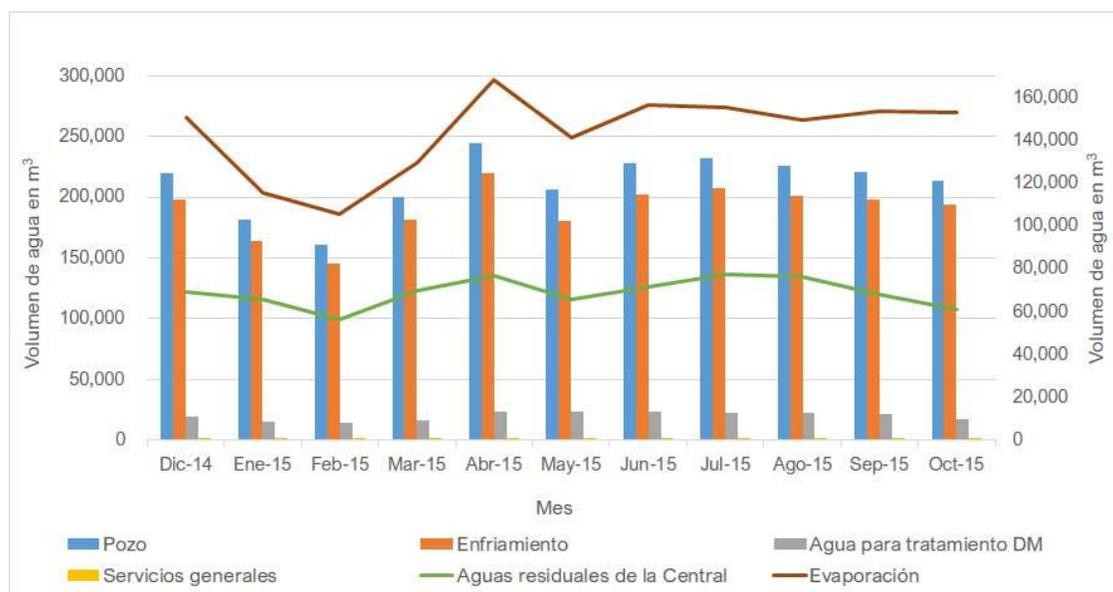


Figura 5.1. Asignación de agua y usos en la unidad de estudio.

Fuente: Comunicación personal.

Cabe mencionar que el volumen total de la descarga corresponde a las dos unidades de CC que conforman a la central; esta descarga desemboca en el canal principal de una presa.

La descarga final de la unidad de estudio tiene su origen en las purgas continuas y discontinuas que se realizan y provienen de

- las aguas del proceso: efluentes de purga de la caldera y aguas que estuvieron en contacto con aceite o combustible
- el sistema de enfriamiento: derivados del tratamiento del agua en circulación
- los efluentes de la planta de tratamiento de agua DM
- los efluentes de aguas sanitarias
- las aguas de limpieza de la torre de enfriamiento, del compresor de la turbina de gas y de la caldera

Las descargas contendrán parte de los compuestos químicos que no reaccionaron, así como sustancias disueltas, suspendidas o emulsionadas que, al ser vertidas en los cuerpos receptores, pueden afectar a los ecosistemas acuáticos o la salud humana (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] & Comisión Nacional del Agua [CNA], s.f.-b). Además, el agua es un medio en el cuál pueden proliferar una gran cantidad de microorganismos (bacterias y protozoarios) o ser vehículo para la transmisión de parásitos. Normalmente, en los estudios de calidad de agua se determinan los componentes anteriores de acuerdo con el uso que se le va a dar y para cumplir con la norma o con las condiciones particulares de descarga, según sea el caso.

### **5.2.2 Estudios de calidad de agua de la unidad de CC**

Uno de los principales datos del inventario que está vinculado al ACV fue el correspondiente a la calidad del agua, tanto de la entrada como de la salida, que fue utilizada en el proceso de generación de energía eléctrica.

Se obtuvieron los estudios de calidad de agua de las descargas de enero a diciembre de 2014 y solamente se obtuvo un estudio de calidad del influente, correspondiente al mes de abril del mismo año.

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados de los parámetros medidos de ambos estudios (influyente y efluente) correspondientes al mes de abril. Los valores de las descargas se compararon con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 5.2  
Estudio de caracterización de la muestra de agua de pozo y descarga de la planta, realizado en abril de 2014.

Influyente			Efluente			Límites máximos permisibles NOM-001-SEMARNAT-1996	
Parámetros	Promedio	Unidades	Parámetros	Promedio	Unidades	Promedio diario	Unidades
pH	7.88	pH	pH	8.23	pH	5-10	pH
Temperatura			Temperatura	21.75	°C	N.A. <sup>(a)</sup>	
Conductividad	303.33	µS/cm	Conductividad	946.5	µS/cm	–	
Nitrógeno total <sup>(b)</sup>			Nitrógeno total <sup>(b)</sup>	< 3.79	mg/l	–	
N de nitratos	0.80	mg/l	N de nitratos	0.19	mg/l	–	
N de nitritos			N de nitritos	0.034	mg/l	–	
Nitrógeno total			Nitrógeno total	0.224	mg/l	60	mg/l
Fósforo total			Fósforo total	1.05	mg/l	30	mg/l
SST <sup>(c)</sup>			SST	< 10	mg/l	200	mg/l
Sólidos sedimentables			Sólidos sedimentables	< 10	mg/l	2	mg/l
Grasas y aceites			Grasas y aceites	14.95	mg/l	25	mg/l
DBO			DBO	13.07	mg/l	200	mg/l
DQO			DQO <sup>(d)</sup>	35.455	mg/l	320	mg/l
Arsénico			Arsénico	< 0.001	mg/l	0.4	mg/l
Cadmio			Cadmio	< 0.020	mg/l	0.4	mg/l
Cianuro			Cianuro	< 0.0257	mg/l	3	mg/l
Cobre			Cobre	< 0.050	mg/l	6	mg/l
Cromo total			Cromo total	< 0.100	mg/l	1.5	mg/l
Mercurio			Mercurio	< 0.0005	mg/l	0.02	mg/l
Níquel			Níquel	< 0.100	mg/l	4.00	mg/l
Plomo			Plomo	< 0.100	mg/l	1.00	mg/l
Zinc			Zinc	< 0.050	mg/l	20	mg/l
Materia flotante			Materia flotante	ausente	mg/l	ausente	mg/l
Coliformes fecales			Coliformes fecales	43	NMP/100 ml	2000	NMP/100 ml
Huevos de helmintos			Huevos de helmintos		huevos/l l	5	huevos/l l
Sólidos totales	251.00	mg/l	Sólidos totales				
SDT <sup>(e)</sup>	248.33	mg/l	SDT <sup>(d)</sup>				
Dureza total	129.79	mg/CaCO <sub>3</sub>	Dureza total		mg/l CaCO <sub>3</sub>		
Alcalinidad a la M	137.02	mg/l	Alcalinidad a la M		mg/l		
Alcalinidad a la F	< 12.66	mg/l	Alcalinidad a la F		mg/l		
Carbonatos	15.05	mg/l	Carbonatos		mg/l		
Bicarbonatos	122.21	mg/l	Bicarbonatos		mg/l		
Cloruros	< 20	mg/l	Cloruros		mg/l		
Sulfatos	11.74	mg/l	Sulfatos		mg/l		
Sílice	69.83	mg/l	Sílice		mg/l		
CO <sub>2</sub>			CO <sub>2</sub>				

<sup>(a)</sup>No aplica; <sup>(b)</sup> Método Kjeldahl; <sup>(c)</sup> Sólidos Suspendedos Totales; <sup>(d)</sup> Límite máximo permisible establecido por la Ley Federal de Derechos; <sup>(e)</sup> Sólidos Disueltos Totales

Nota: La NOM-001-SEMARNAT-1996 no contempla la DQO; sin embargo, está expresada dentro de los parámetros de la descarga.

Podemos observar, en primera instancia, que no todos los parámetros que se miden a la entrada se miden a la salida. La medición de los parámetros de entrada tiene como objetivo determinar la calidad de agua para que, en caso de ser necesario, se aplique un pretratamiento para eliminar

compuestos químicos no deseables. Se buscará que el agua de salida cumpla con los estándares requeridos, eliminando bicarbonatos, materia en suspensión y materia orgánica, antes de entrar al sistema DM para optimizar el funcionamiento de los intercambiadores iónicos y del sistema de membranas.

Entre las mediciones más importantes que se muestran en la calidad del agua del influente se encuentran la cantidad de carbonatos, bicarbonatos y sílice, ya que, si presentan niveles elevados, podrían ocasionar problemas de saturación de resinas o ensuciamiento de membranas.

Por otro lado, el valor de pH se encuentra por debajo de 8. Valores superiores a 8.5 definen la calidad de agua con características incrustantes para calderas y tuberías.

El valor de dureza total, medida como mg de  $\text{CaCO}_3$ , está formado principalmente por la suma de sales de calcio y magnesio —impurezas que pueden causar incrustaciones y/o corrosiones en las tuberías y problemas de arrastre. De acuerdo con el resultado mostrado en la Tabla 5.2, estas sales se encuentran, en su mayor parte, en forma de bicarbonatos.

Para evitar los problemas mencionados es necesario que el agua de alimentación de la caldera tenga un valor de 10 g de  $\text{CaCO}_3$  por  $\text{m}^3$  de agua, lo que equivale a 10 mg/l (Sincal Calderas Industriales, 2018).

El valor de la conductividad está determinado por las sales que integran la dureza del agua, las cuales constituyen el 90% de los sólidos disueltos totales (SDT). La concentración de sólidos disueltos es directamente proporcional al valor de la conductividad. Esta relación se expresa mediante la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ ppm} = 2 \text{ } \mu\text{S/cm}$$

En el estudio de calidad del agua del efluente, tenemos un valor de conductividad de 946.5  $\mu\text{S/cm}$ , equivalente a 473.25 ppm de SDT. De acuerdo con los valores de las tablas de dureza, valores > 420 ppm corresponden a un agua muy dura (InfoAgro Systems, s.f.).

Por otro lado, el pH es un factor decisivo para la sobrevivencia de las especies acuáticas. Una alteración en el rango óptimo de pH en el que éstas se desarrollan podría reducir la biodiversidad en el ecosistema. El valor del pH del efluente es de 8.23. Un medio acuático con un valor de pH < 6.5 o > 8.5 dejaría de ser adecuado para el desarrollo de organismos y peces (IMTA & CNA, s.f.-b).

También se puede observar que los parámetros de metales pesados, no metales, DBO, DQO, SST y grasas y aceites de la descarga se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Sin embargo, hay parámetros que no están normados, por ejemplo, el nitrógeno (como nitratos y nitritos) —que repercute en la eutrofización de los cuerpos de agua— y la conductividad, que, de manera indirecta, hace referencia a los sólidos disueltos totales.

La norma NMX-AA-093-SCFI-2000 señala que el parámetro de la conductividad «está regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos

receptores», y agrega que «es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano» (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000); sin embargo, las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996a, 1996b), que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, no hacen referencia a este parámetro. Además, no incluyen como parámetros obligatorios la medición de los sulfatos ni de los SDT.

Los resultados mostrados en la Tabla 5.2 referentes a los parámetros de la descarga son similares a los resultados presentados en el resto de los estudios de calidad del agua de las descargas del año 2014. La variación entre las mediciones de los parámetros de un mes con respecto a otro es mínima. El único parámetro que presenta cambios significativos en los resultados mensuales es el referente a la conductividad, que es el parámetro que se analiza a continuación.

La muestra de la descarga es una muestra compuesta conformada por 6 muestras simples, cada una tomada cada 4 horas durante 24 horas. En la Figura 5.2 se presentan el valor promedio de la conductividad de las muestras, así como los valores máximo y mínimo.

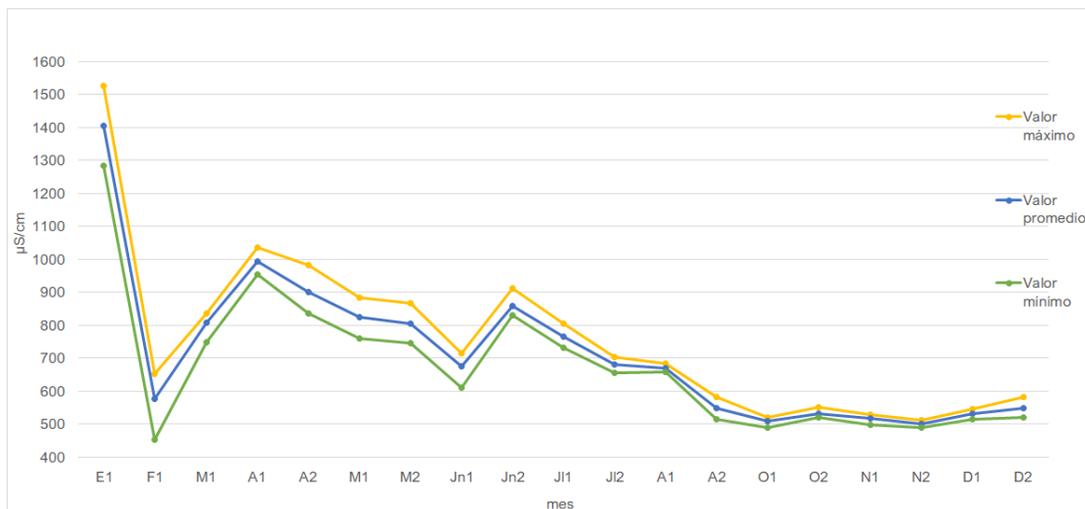


Figura 5.2. Conductividad eléctrica del agua medida durante el año de puesta en marcha de la unidad de ciclo combinado.

El valor promedio más alto (1,403 µS/cm) se presenta en el mes de enero, cuando la unidad de CC aún no había sido reconvertida para elevar su potencia. Esta reconversión implicó la instalación de una turbina de gas y un HRSG —con sus respectivos sistemas auxiliares—, adecuaciones a la turbina de vapor existente y la ampliación de la torre de enfriamiento. En febrero, entró en operación la nueva unidad de CC y hubo cambios en el sistema de tratamiento de agua DM. A esto se debe la caída del valor de la conductividad.

En los meses siguientes, la conductividad presentó variaciones hasta alcanzar un valor promedio de aproximadamente 500 µS/cm en el período de agosto a diciembre, lo cual sugiere que se alcanzó una estabilidad en el proceso de generación.

Es importante notar que las fluctuaciones en la conductividad indican que se llevaron a cabo ajustes en la cantidad de los compuestos químicos utilizados para obtener la calidad de agua requerida en el proceso, como se verá en la siguiente sección.

### 5.3 Compuestos químicos y toxicidad

Para conocer los impactos potenciales de la descarga, se consultaron las fichas técnicas de los compuestos químicos utilizados para el acondicionamiento del agua y los resultados de ensayos toxicológicos para cada uno de ellos.

Una prueba de toxicidad, bioensayo o ensayo biológico es una herramienta que permite evaluar el riesgo que implica para el medio acuático la presencia de contaminantes; los organismos se exponen a diferentes concentraciones de los contaminantes y se estudian los efectos (IMTA & CNA, s.f.-a).

Los efectos más estudiados son la muerte (letales) y la afectación de las funciones biológicas fundamentales (subletales), como la reproducción y el crecimiento, debido a que son los que repercuten de manera considerable en el desempeño de las comunidades acuáticas, en sus interrelaciones y en la dinámica de los ecosistemas (IMTA & CNA, s.f.-a; Universitat de Barcelona, 2020). Los efectos nocivos se clasifican en agudos y crónicos.

El efecto agudo es aquel que se presenta como una respuesta rápida o severa ante un estímulo. Por lo general, se manifiesta en menos de 96 horas como mortalidad, inmovilidad o desintegración. Los parámetros que generalmente se calculan en los bioensayos de toxicidad aguda son la concentración letal media ( $LC_{50}$ ) o la concentración efectiva media ( $EC_{50}$ ). La  $LC_{50}$  indica la concentración de una sustancia que provoca la muerte del 50% de la población de los organismos expuestos; por su parte, la  $EC_{50}$  es la concentración de una sustancia que se espera produzca un determinado efecto en el 50% de los organismos expuestos (IMTA & CNA, s.f.-a; Asociación Española de Toxicología, 1995).

Por otro lado, el efecto crónico se refiere a la respuesta a un estímulo que persiste por largo tiempo, generalmente, durante el ciclo de vida de los organismos bajo estudio. Las concentraciones del agente tóxico no provocan la muerte de los organismos expuestos; sin embargo, afectan una o varias de sus funciones biológicas. Los parámetros que se utilizan para evaluar estos efectos son la concentración efectiva media ( $EC_{50}$ ), la concentración del agente tóxico que no causa daño o efecto observable (NOEC o concentración de efecto no observado) y la concentración más baja en que se inicia la producción de efectos (LOEC o concentración de efectos mínimos observables) (IMTA & CNA, s.f.-a).

A partir de los resultados de los bioensayos, se establecen los límites permitidos para los distintos contaminantes, se evalúa el impacto de mezclas sobre las comunidades de los ambientes que las reciben y se compara la sensibilidad de una o más especies a distintos tóxicos o a diferentes condiciones para el mismo tóxico (Centro Científico Tecnológico [CCT] CONICET Mendoza, s.f.).

Normalmente, para este tipo de estudios se sugiere el empleo de por lo menos tres diferentes organismos de prueba de distintos niveles tróficos (IMTA & CNA, s.f.-a.). Para el medio acuático, los bioensayos se llevan a cabo con organismos que tienen una mayor sensibilidad a los tóxicos, como es el caso de la pulga de agua (*Daphnia magna*), ya que, al establecerse concentraciones seguras para ellos, se espera proteger a todo el ecosistema; sin embargo, hay que tener en cuenta que distintas especies tienen diferente sensibilidad a distintas sustancias químicas.

La Tabla 5.3 resume los tipos de ensayo de toxicidad típicos en pruebas aplicadas para productos químicos de tratamiento de agua.

Tabla 5.3  
Tipos de ensayos de toxicidad para químicos empleados en el tratamiento de agua

Elementos del ensayo		Métodos de ensayo
Contenido de sustancias tóxicas como impurezas		Análisis químico de As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , T-Hg, T-Cr, Cd, Pb, CN, etc.
Toxicidad aguda	Oral	LD <sub>50</sub> de ratón o rata
	Inhalación	LD <sub>50</sub> de ratón o rata
Irritación tópica	Irritación cutánea	Ensayo de Draize
	Irritación ocular	Ensayo de Draize
Biodegradación		Método MITI (ensayo de biodegradación utilizando lodo activado)
Toxicidad aguda en peces		LD <sub>50</sub> de peces
Sensibilización		Prueba de parche con conejillos de Indias
Mutación		Ensayo de Ames
		Ensayo de mutación génica en células de mamífero
Toxicidad subaguda		Nivel sin efecto adverso observable (NOAEL) de ratón o rata

Fuente: Tabla elaborada con información de Kurita (1999).

Para nuestro estudio, se eligieron datos de ecotoxicidad sobre organismos representativos de diferente nivel trófico del medio acuático y datos de toxicidad para el ser humano. En los casos en donde estos últimos no se encontraron, se seleccionaron los datos correspondientes a estudios toxicológicos en roedores, principalmente ratones. Estos animales son los más utilizados en la investigación debido a que su genoma coincide en más del 95% con el del ser humano.

### 5.3.1 Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos químicos utilizados en el tratamiento interno del CAV

Hay cuatro sustancias químicas que entran directamente con el agua de alimentación del CAV: hidracina, fosfatos disódico y trisódico, y ciclohexilamina.

a) *Hidracina*

De todos estos compuestos, la hidracina es el que puede provocar mayor daño al ser humano, ya que se considera una sustancia cancerígena.

Es un compuesto inorgánico, miscible en agua, que actúa como secuestrante de oxígeno, liberando nitrógeno al realizarse la reacción que se muestra a continuación:



Adicionalmente, al entrar en contacto con el óxido férrico, forma magnetita (capa protectora, estable a altas temperaturas), agua y nitrógeno:



En datos de toxicidad reportados por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), citado en PubChem (s.f.-h), se encontró que, a una concentración de 0.5 mmol/l/20 h, la hidracina provoca daños en el ADN del pulmón tanto para humanos como para ratas. Además, se encontraron bioensayos de toxicidad en ratas que muestran que la dosis letal media (LD<sub>50</sub>) por vía oral es de 60 mg/kg, y la concentración letal media (LC<sub>50</sub>) por vía inhalatoria es del orden de 570 mg/l.

En el medio acuático, también se ha identificado que este químico puede causar daño en diferentes tipos de organismos. El alga verde presenta una disminución en la abundancia con una EC<sub>50</sub> baja de 0.001 µl/l; y en peces, las LC<sub>50</sub> varían desde 0.75 mg/l (para el pez cacho) hasta 2.03 mg/l (para el pez cebra). En una prueba se encontró que para la *Daphnia pulex* —una especie de pulga de agua—, una concentración de 1.16 mg/l en 24 horas elimina a la mitad de la población observada. Por lo que estos resultados sugieren que este compuesto puede afectar varios eslabones de la cadena trófica.

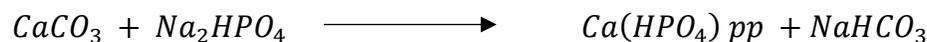
b) *Fosfatos disódico y trisódico*

Ambos compuestos son inorgánicos y solubles en agua. Se utilizan como *buffers* y reguladores del pH e intervienen en la precipitación del calcio, como se muestra en las siguientes reacciones:

Para el fosfato trisódico,



Y para el fosfato disódico,



<sup>2</sup> pp = precipitación

Los fosfatos disódico y trisódico son compuestos tóxicos e irritantes para el ser humano, y el nivel de afectación depende del grado y la forma de exposición que se tenga al producto.

El fosfato disódico provoca eutrofización en los cuerpos de agua receptores y afecta a los organismos acuáticos. Se encontraron resultados de bioensayos en donde se expone a distintos organismos a esta sustancia, llegándose a determinar que para la *Daphnia magna*, la  $LC_{50}$  es de 1,154 mg/l/25 h, y la dosis letal para el ser humano es de 50 g (ver Tabla D.12 del Anexo D).

Con respecto al fosfato trisódico, se encontró que concentraciones superiores a 0.015 mg/l provocan crecimiento de algas, y las pruebas de toxicidad efectuadas en peces mostraron concentraciones letales de 88,300  $\mu$ g/l en 24 h.

### c) Ciclohexilamina

La ciclohexilamina es una amina volátil efectiva para el control del pH y la corrosión. Es un compuesto orgánico miscible en agua, antioxidante, tóxico, irritante y peligroso para el ser humano. Puede quemar la piel y los ojos y es nocivo para los organismos acuáticos.

Se reporta un TWA de 10 ppm y existen datos sobre mutaciones en análisis citogenéticos en leucocitos humanos con una dosis de 10  $\mu$ mol/l/5 h (PubChem, s.f.-d).

No se reportan datos directos de toxicidad en organismos acuáticos. Sin embargo, de manera indirecta, se detecta que una muestra de 200 mg/l de ciclohexilamina sujeta a un tratamiento de lodos activados puede ser tóxica a los microorganismos presentes, ya que la muestra no fue degradada (PubChem, s.f.-d). Un efecto directo se muestra en la inhibición del crecimiento de trofozoítos de *Giardia lamblia* expuesta a una concentración inhibitoria ( $CI_{50}$ ) de 1.646 mM en 72 horas (Fernandes, 2014).

La cantidad de compuestos químicos empleados en la unidad de CC para el acondicionamiento del agua en el tratamiento interno del CAV en el mes de estudio (diciembre de 2014) se muestra en la Figura 5.3.

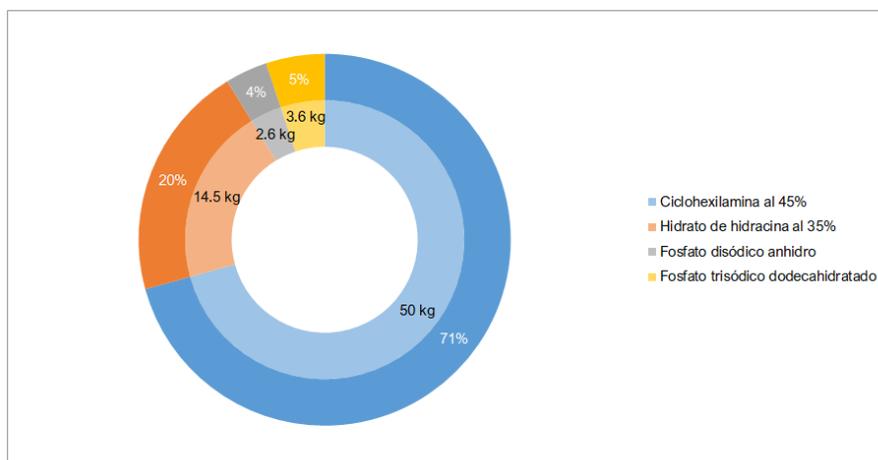


Figura 5.3. Consumo de compuestos químicos empleados en el CAV de la unidad de estudio en el mes de diciembre de 2014.

Podemos observar que los compuestos químicos de mayor consumo son la ciclohexilamina y la hidracina. Aunque los efectos de la ciclohexilamina en organismos acuáticos no han sido completamente estudiados, se sabe que tiene un efecto mutagénico en el ser humano. Por otro lado, la hidracina, aunque se consume en menor proporción, también es tóxica; sin embargo, es un compuesto clave por su efecto secuestrante y protector de las tuberías.

La Figura 5.4 muestra los consumos de químicos realizados durante el período de enero de 2010 a octubre de 2015 por las dos unidades de CC que integran la central.

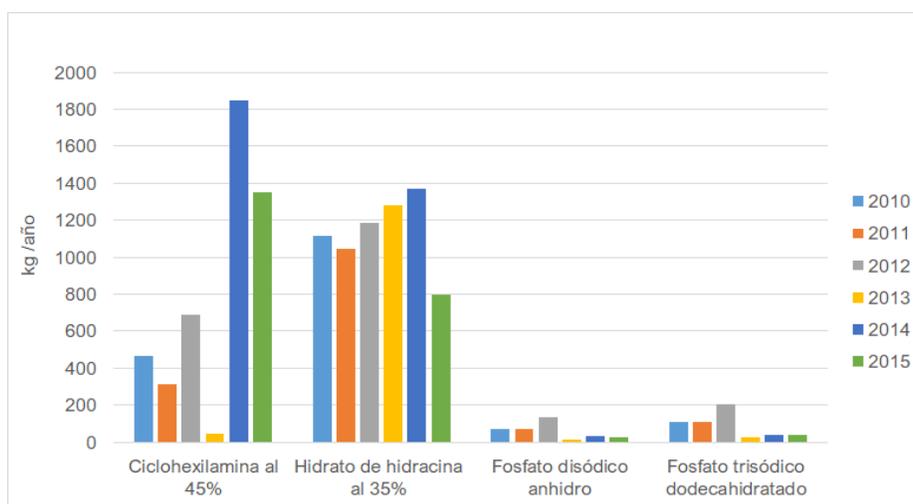


Figura 5.4. Consumo de compuestos químicos empleados en el CAV, de enero de 2010 a octubre de 2015.

Fuente: Comunicación personal

El consumo de hidracina en el período de análisis tiene un aumento gradual, exceptuando el último año. En cambio, la ciclohexilamina presenta un patrón de consumo irregular.

De 2010 a 2013, la hidracina tuvo un mayor consumo que la ciclohexilamina. A partir de 2014 — año en que se pone en marcha la unidad reconvertida —, hay un cambio en este patrón: el consumo de ciclohexilamina no solo se dispara en comparación con el de los años anteriores, sino que también supera el consumo de la hidracina. Este cambio podría deberse a las condiciones de operación de la nueva unidad.

Los fosfatos se consumen de manera conjunta. Comparados con la hidracina y la ciclohexilamina, su consumo es menor. El fosfato trisódico se consume más que el disódico y, para los últimos tres años, ambos productos fueron utilizados en menor cantidad, lo que podría significar una menor posibilidad de problemas de eutrofización en el cuerpo de agua receptor. Esta disminución en su consumo podría deberse a que aumentó el consumo de la ciclohexilamina, la cual, al igual que los fosfatos, tiene un efecto regulador de pH.

Se proporciona más información sobre estos compuestos y su toxicidad en el Anexo D.

### 5.3.2 Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos químicos utilizados en el sistema de enfriamiento

Para el acondicionamiento del agua del sistema de enfriamiento se utilizan los siguientes compuestos:

#### a) *Biocida oxidante: hipoclorito de sodio*

El biocida oxidante hipoclorito de sodio es un líquido claro con olor a cloro, que no se produce de forma natural en el medio ambiente. Este compuesto inorgánico es soluble en agua; es ampliamente utilizado como parte de las soluciones de limpieza y blanqueadores, y se emplea como desinfectante disuelto en agua en varias concentraciones.

Se han realizado ensayos de toxicidad para medir la irritación en piel u ojos, cambios en el ADN y toxicidad aguda. Se encontró que, en seres humanos, la dosis tóxica más baja publicada por vía intravenosa es de 45 mg/kg de peso y los efectos se presentan en pulmones, tórax, cambios en la respiración, náusea y vómito.

El hipoclorito es una sustancia muy tóxica para los organismos acuáticos. Pruebas ecotoxicológicas realizadas con este microbicida han sido aplicadas en varias concentraciones a una extensa gama de organismos —aves, peces, crustáceos y organismos marinos, entre otros. Una prueba realizada a *Daphnia magna*, con una edad menor a 24 horas, dio como resultado una EC<sub>50</sub> de 2.3 ppm.

#### b) *Biocida I a base de isotiazolinonas y DBNPA*

Otro producto químico empleado es el Biocida I de amplio espectro no oxidativo a base de isotiazolinonas y 2,2-dibromo-nitrilopropionamida (DBNPA). Ambos compuestos son orgánicos y solubles en agua y presentan diferentes resultados en pruebas toxicológicas.

La metil isotiazolinona (MIT) es utilizada como conservador en productos de cuidado personal y cosméticos, así como para el control de bacterias, hongos y algas formadoras de limo en sistemas de agua de refrigeración. Estudios referentes a la exposición humana realizados in vitro muestran que una breve exposición a la MIT es altamente tóxica para cultivos de neuronas. Existe una respuesta a la dosis umbral de la MIT a 100 ppm (0.01%) y puede usarse de manera segura como conservador en cosméticos hasta esa concentración.

En estudios con ratas, pruebas de toxicidad con Kathon 886 —nombre comercial— dieron como resultado una LD<sub>50</sub> de 105 mg/kg, por vía oral.

También se han realizado pruebas ecotoxicológicas en aves, peces y crustáceos. En uno de los datos obtenidos, se observó una LC<sub>50</sub> de 190 µg/l en un período de 96 horas para la trucha arcoíris.

En lo que se refiere al DBNPA, sus usos principales son como alguicida, bactericida y fungicida en sistemas de agua de refrigeración. Los daños que puede provocar al ser humano incluyen irritación de ojos, garganta y vías respiratorias. Se han realizado estudios en animales de distintas especies. En conejos la irritación ocular causa lesiones corneales severas.

En pruebas de ecotoxicidad, si el compuesto es liberado al agua, no se espera que se adsorba a los sólidos y sedimentos suspendidos según su coeficiente de carbono orgánico (Koc) estimado. Un factor de bioconcentración (BCF) estimado de 3 sugiere que el potencial de bioconcentración en organismos acuáticos es bajo. La LC<sub>50</sub> en trucha arcoíris es de 1,000 µg/l para un período de 96 horas.

*c) Biocida II: sulfato de tetrakis hidroximetil fosfonio (THPS)*

Es un compuesto orgánico soluble en agua, y no hay evidencia de que sea un compuesto cancerígeno. Sin embargo, los estudios toxicológicos en ratas muestran que tiene un efecto letal para el 50% de la población estudiada con una dosis de 333 mg por kg de peso corporal administrada por vía oral; en la trucha arcoíris se obtuvo una LC<sub>50</sub> de 94,000 µg/l en un período de 96 horas.

Si se libera en el agua, no se espera que se adsorba a los sólidos y sedimentos suspendidos según el Koc estimado. Un BCF estimado de 3 sugiere que el potencial de bioconcentración en organismos acuáticos es bajo.

Este compuesto contiene grupos funcionales que se hidrolizan en condiciones ambientales (con un pH entre 5 y 9), por lo que se espera que la hidrólisis sea un proceso importante del destino ambiental.

*d) Biodispersante: D-Limoneno*

El D-Limoneno es un compuesto orgánico, insoluble en agua, que irrita la piel tanto en humanos como en animales de experimentación. No hay pruebas suficientes de que sea un compuesto cancerígeno para los humanos, pero sí las hay para animales de experimentación. Este compuesto produce tumores tubulares renales en rata macho, evidencia que no fue comprobada en humanos.

El órgano crítico en los animales (a excepción de las ratas macho) después de la administración oral o intraperitoneal es el hígado. La exposición al limoneno afecta la cantidad y la actividad de diferentes enzimas hepáticas, el peso del hígado, los niveles de colesterol y el flujo de bilis. Estos cambios se han observado en ratones, ratas y perros. La LD<sub>50</sub> en rata, por vía oral, es de 5 g/kg.

En el ambiente acuático, el limoneno exhibe una alta toxicidad aguda para los peces y las dafnias. Para la *Daphnia magna*, la LC<sub>50</sub> es de 0.577 mg/l/48 h.

*e) Toliltriazol (TTA)*

El toliltriazol (TTA) es un compuesto orgánico insoluble en agua.

Se reportan datos relacionados a la toxicidad humana, en pruebas efectuadas en animales. Por ejemplo, en estudios en ratas, se obtuvo una LC mayor a 1,730 mg/m<sup>3</sup> durante una hora, por vía de exposición inhalatoria. Se menciona en la literatura que es nocivo para la vida acuática con efectos duraderos. Sin embargo, no se encontraron resultados de pruebas ecotoxicológicas.

f) 2-hidroxifósfono ácido acético (HPAA)

La información de este compuesto es escasa, pero se sabe que es un compuesto orgánico, miscible en agua.

No se encontraron resultados de toxicidad para el ser humano ni para el medio acuático; sin embargo, esta sustancia provoca quemaduras en la piel y lesiones oculares graves. Además, la exposición prolongada puede causar daño en órganos.

g) Ácido sulfúrico

Este compuesto inorgánico es miscible en agua, extremadamente corrosivo y causa severos daños a la piel. Hay evidencia suficiente de estudios que sostiene que vapores que contengan ácido sulfúrico son carcinógenos para los humanos.

Dependiendo de la duración de la exposición, la  $LC_{50}$  varía de 0.37 a 0.42 mg/l en ratas, 0.6 a 0.85 mg/l en ratones y de 1.47 a 1.61 mg/l en conejos. El estudio de toxicidad oral aguda indicó una  $LD_{50}$  de 2,140 mg/kg en ratas.

La toxicidad del ácido sulfúrico para la vida acuática es una función del pH resultante. Se encontró que un pH de 4.0 provocó irritación branquial pronunciada, y uno de 3.5 causó la muerte del pez luna, róbalo y carpa. Una concentración de iones de hidrógeno de entre 3.0 y 3.5 causó el 50% de mortalidad de la mojarra oreja azul en 96 h. La principal causa de toxicidad en peces parece estar relacionada con la alteración del equilibrio de sodio y la respiración.

La Figura 5.5 muestra el consumo de compuestos químicos empleados en el sistema de enfriamiento durante diciembre de 2014.

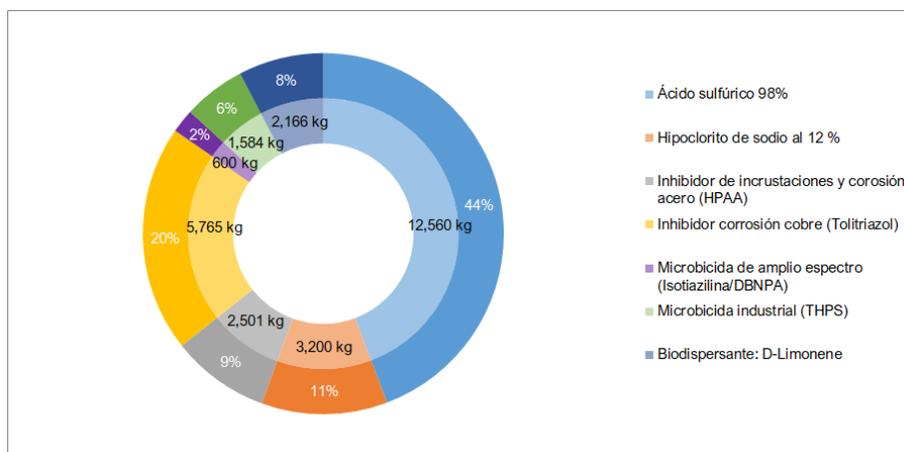


Figura 5.5. Consumo de compuestos químicos empleados en el sistema de enfriamiento en el mes de diciembre de 2014.

El ácido sulfúrico —utilizado para neutralizar el pH— fue el compuesto de mayor consumo, seguido por el toliltriazol —utilizado como inhibidor de cobre. Es probable que el primero se

encuentre en la descarga en forma de sales, como producto de la reacción. Y el segundo, por ser insoluble en agua, es probable que también se encuentre, aunque se desconoce la forma y el daño que pudiera ocasionar.

La Figura 5.6 muestra los consumos realizados durante el período de enero de 2010 a octubre de 2015 por las dos unidades que integran la central.

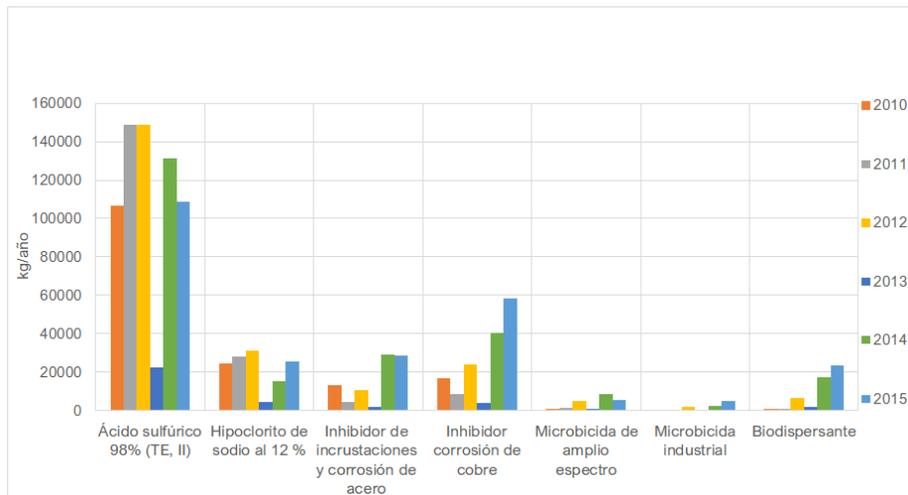


Figura 5.6. Consumo de compuestos químicos empleados en el sistema de enfriamiento, de enero 2010 a octubre de 2015.

Fuente: Comunicación personal

Podemos observar tres grupos de consumo: alto, medio y bajo.

El ácido sulfúrico es el compuesto que se consume en mayor cantidad: en la Figura 5.6 se muestran las cantidades que se emplearon en el sistema de enfriamiento y en la regeneración de resinas del tratamiento de agua desmineralizada.

De 2010 a 2012 se presentaron altos consumos de ácido, que disminuyeron en 2013 y volvieron a elevarse en 2014 y 2015.

El hipoclorito de sodio y los inhibidores de corrosión e incrustaciones son de consumo medio, mientras que los microbicidas y el biodispersante tienen un consumo bajo; sin embargo, se sabe que son compuestos tóxicos.

Se observa que, durante el 2013, los consumos de todos los compuestos disminuyeron y volvieron a elevarse en los años posteriores; los consumos del inhibidor de cobre y del biodispersante sobresalen en el año 2015, comparados con los de los años anteriores. Esto podría explicarse por la ampliación de la torre de enfriamiento, ocurrida en el 2014.

En el Anexo D se proporciona más información sobre las características y toxicidad de los compuestos empleados.

### 5.3.3 Daños potenciales al ser humano y al ambiente por compuestos utilizados en el tratamiento de agua desmineralizada

Los compuestos empleados para la regeneración de las resinas y la limpieza de membranas son ácido sulfúrico e hidróxido de sodio para el tratamiento de II y una solución de fosfonatos para el tratamiento de OI. La toxicidad del ácido sulfúrico se comentó en el apartado anterior, por lo que en este apartado solamente se mencionará la toxicidad de los otros compuestos.

#### a) Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio, o sosa cáustica, es un compuesto inorgánico, soluble en agua, corrosivo e irritante que causa severas quemaduras en la piel y daños graves a los ojos. Además, es tóxico si se ingiere: los casos de intoxicación humana indican que una dosis de 10 g por vía oral es mortal.

En los bioensayos realizados en conejos, se encontró que con una solución al 10%, la LD<sub>50</sub> es de 500 ml/kg, y que una concentración de 500 mg/kg causa irritación severa en la piel.

Concentraciones de entre 20 a 100 mg/l en agua provocan la muerte en algunas especies de vida silvestre acuática debido al aumento en el pH; por ejemplo, en bioensayos realizados en carpas se obtuvo una LC<sub>100</sub> de 180 ppm en 24 horas.

#### b) Solución de fosfonatos: dietil (3-bromopropil) fosfonato

Es un compuesto orgánico, poco soluble en solventes polares. Este agente quelante se emplea para la limpieza de las membranas en el tratamiento de OI (QuimiNet.com, 2012).

Este compuesto causa irritación en piel y ojos. Sin embargo, la información sobre su toxicidad es escasa. En organismos acuáticos, se reporta que en peces la concentración letal para eliminar el 50 % de la población en un período de 48 h esta entre 0.1 y 1.1 mM.

La Figura 5.7 muestra el consumo de compuestos químicos empleados en el tratamiento de agua DM durante el mes de diciembre de 2014.

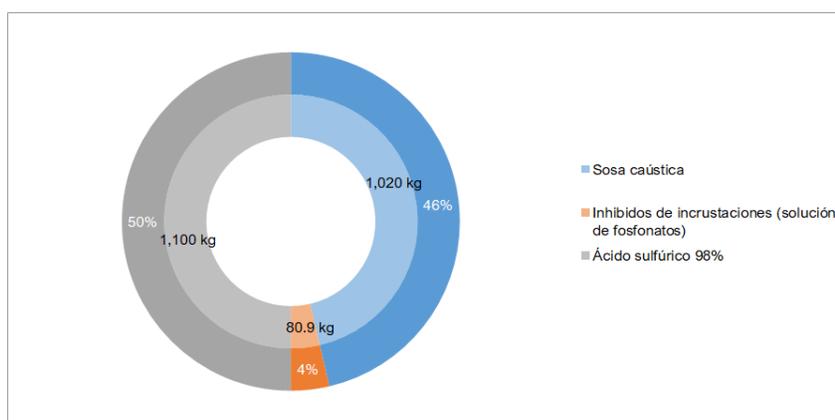


Figura 5.7. Consumo de compuestos químicos empleados en el tratamiento de agua DM en el mes de diciembre de 2014.

Las cantidades utilizadas para la regeneración de resinas superan las empleadas para la limpieza de las membranas. El consumo de sosa caustica y ácido sulfúrico podría disminuir en el momento en que el tratamiento por intercambio iónico disminuya y se utilice el de ósmosis inversa para producir mayor cantidad de agua desmineralizada, lo cual incrementaría el consumo de la solución de fosfonatos.

La Figura 5.8 muestra los consumos realizados por las dos unidades de CC que integran la central durante el período de enero de 2010 a octubre de 2015.

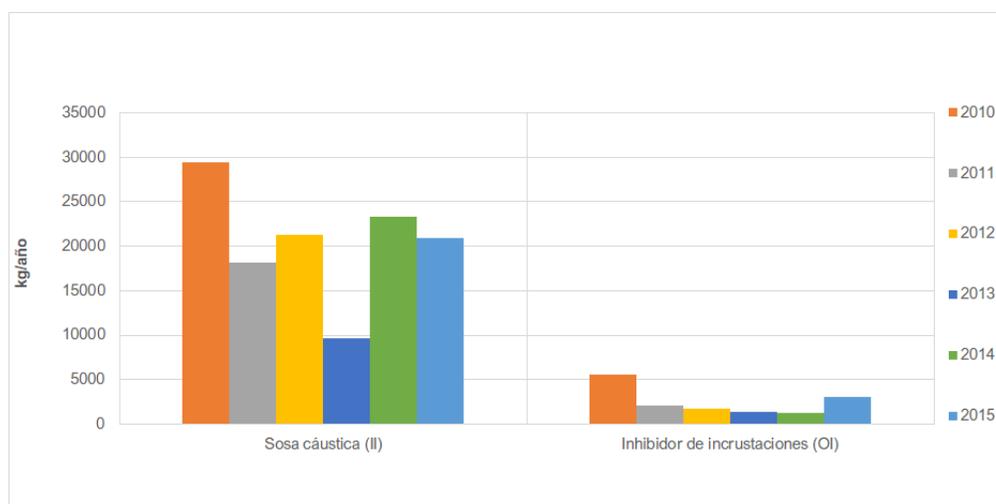


Figura 5.8 Consumo de compuestos químicos en el tratamiento de agua DM, de enero 2010 a octubre de 2015.

Fuente: Comunicación personal

En el año 2010, las cantidades de hidróxido de sodio y fosfonatos fueron superiores a las de los años posteriores. El año 2013 sigue siendo peculiar, puesto que hay una disminución en los consumos. Esta caída podría sugerir una disminución en la producción de energía eléctrica de la central. En el 2014 vuelve a incrementarse el consumo, y en el 2015 el patrón de consumo sugiere que el tratamiento de OI sería el más utilizado en la producción de agua DM.

En el caso de los compuestos orgánicos, se desconoce la forma en que pueden encontrarse en la descarga. Algunos de ellos podrían estar de forma combinada con otros compuestos, haberse degradado o mantener su composición debido a su insolubilidad. Estos compuestos podrían ser considerados como contaminantes emergentes desde el punto de vista de que han estado presentes por mucho tiempo, pero su existencia e importancia están siendo identificadas ahora.

Por otro lado, la mayoría de los compuestos inorgánicos forma sales, que pueden contribuir a la salinidad del cuerpo receptor.

Además, la información proveniente de los bioensayos, algunos de los cuales consideran diferentes especies representativas, confirma el hecho de que estos compuestos causan daño al medio ambiente.

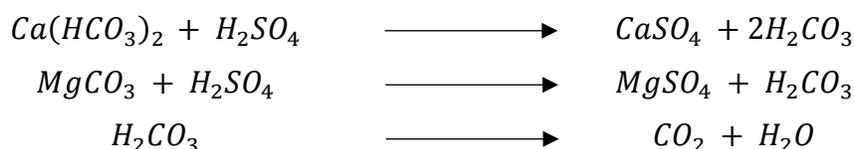
Ciertamente, el consumo de estos químicos por MWh es bajo, incluso, podría considerarse insignificante. Sin embargo, al examinar los riesgos potenciales que implica la presencia de estas sustancias, lo que parece desdeñable a primera vista, podría no serlo después de observar su toxicidad y otras características.

Pongamos por ejemplo el caso de la ciclohexilamina. De acuerdo con la información de la planta, en promedio se consumen  $1.85 \times 10^{-4}$  kg por MWh de esta sustancia para el tratamiento de agua. En el 2016, las centrales de CC en México produjeron 160,378 GWh de electricidad (SENER, 2018a), lo que, de acuerdo con nuestros cálculos, dio como resultado un consumo anual de 30 t de ciclohexilamina. Para 2032, se espera que las centrales de CC generen 246,990 GWh (SENER, 2018a), lo que requerirá el consumo de 46 t aproximadamente de esta sustancia para acondicionar el agua en un año. Esta estimación es bastante conservadora; sin embargo, pone de manifiesto la cantidad de una sola sustancia química tóxica que podría ser vertida en el medio ambiente en las descargas de aguas residuales y solo por un tipo de tecnología.

## 5.4 Impacto por la presencia de sales en las descargas

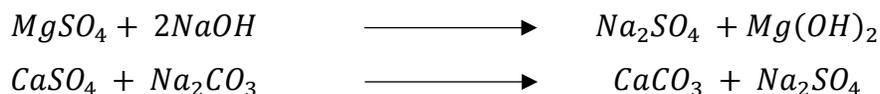
La dureza del agua está determinada por la concentración de calcio y magnesio, y se clasifica en dureza carbonatada y dureza no carbonatada.

La dureza carbonatada se caracteriza porque el agua contiene bicarbonatos de calcio y de magnesio. Para eliminarla, se agrega ácido sulfúrico, el cual genera las siguientes reacciones:



En las dos primeras reacciones se produce ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), que provoca la disminución del pH. El  $H_2CO_3$ , a su vez, se descompone en  $CO_2$  y  $H_2O$ .

Por otro lado, la dureza no carbonatada se debe a cloruros, nitratos y sulfatos de calcio y magnesio. Para eliminarla, se agrega hidróxido de sodio. En el caso de los sulfatos, se producen las siguientes reacciones:



Los productos de estas reacciones son sales de carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio, y remanentes de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio.

Como se observó en el estudio de calidad del agua de abril 2014, tomando como medida la conductividad, existe una mayor concentración de sales en las descargas que en el agua que se extrae del pozo.

En un análisis de agua, es imposible determinar la cantidad de carbonato de magnesio o sulfato de calcio por la ionización que sufren estos compuestos en el agua. Solamente es posible determinar los constituyentes disueltos a través de sus iones. Los iones positivos (cationes) y los iones negativos (aniones) pueden separarse y medirse y, por lo tanto, las impurezas disueltas en el agua se expresan como iones, en partes por millón.

Dado que este estudio se enfoca en la calidad del agua, era importante conocer la composición de las purgas que integran la descarga final de la planta de CC. Esta información no pudo ser obtenida. Sin embargo, fue posible obtener un estudio sobre la calidad del agua de otra termoeléctrica ubicada en el estado de Chiapas. Esta planta utiliza tecnología convencional; cabe mencionar que, aunque el agua de entrada es de origen superficial, su composición es similar a la de la planta de estudio.

Es importante señalar que, si bien la tecnología convencional forma parte de la tecnología de CC, podría haber diferencias en los resultados de las purgas entre ambas plantas. Estas diferencias se deben a la operación de las unidades de desmineralización, los ciclos de concentración de sales en la torre de enfriamiento y la cantidad y tipos de compuestos químicos empleados para acondicionar el agua, entre otras.

#### **5.4.1 Calidad del agua de la descarga en una termoeléctrica convencional**

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de la calidad de agua de muestras obtenidas de la planta convencional. El agua de entrada procede de un río. El tratamiento de desmineralización es a base de intercambio iónico, y las muestras de agua fueron tomadas en diferentes sitios de la planta:

- el influente y su pretratamiento,
- a la salida del sistema de desmineralización, después de la neutralización,
- en el sistema de refrigeración (se tomaron muestras del agua de repuesto, recirculación y purga) y
- en la caldera de recuperación (entrada a la caldera y purga de la caldera).

Tabla 5.4  
Estudio de calidad del agua de una termoelectrica convencional

Parámetro	Unidad	Río		Fosa de neutralización	Sistema enfriamiento			Caldera de Recuperación - Generador de Vapor		
		Entrada	Pre-tratamiento	UDAS *	Repuesto	Recirculación	Purga	Entrada Caldera	Purga caldera	
<b>Tipo de agua: Superficial</b>										
Conductividad	CEa	dS/m	0.307	0.31	9.938	0.347	1.294	1.27	0.028	0.023
Sólidos disueltos totales	SDT	mg/l	214	206	8547	227	990	1039	21	
<b>Alcalinidad y dureza del agua de suministro</b>										
Alcalinidad total		todos en mg/L CaCO <sub>3</sub>	94.9	95.9	45.6		12.6	28.2	3.71	
Carbonatos			0	0	0		0		1.24	
Bicarbonatos			94.9	95.9	45.6		12.6	28.2	2.47	
Dureza total			136	134	788	140	568	568	8.75	33.9
Dureza de calcio			95.7	93.7	598	110	429	409	3.75	16
Dureza de magnesio			40.3	40.3	190	30	139	159	3	17.9
Dureza carbonatada			94.9							
Dureza no carbonatada			41.1				0	0	0	
<b>Composición de sólidos</b>										
ST (sólidos totales)		mg/L	230.5							
SST (Sólidos suspendidos totales)			16.5	1.17	< 22.6	1.25	5.55	< 17	<1.17	
SDT (Sólidos disueltos totales)			214	206	8547	227	990	1039	21	
<b>Cationes y aniones</b>										
<b>Cationes</b>										
Calcio	Ca <sup>++</sup>	mg/l	35.2	37.3	210	37.3	144.7	147.5	1.5	7.78
Magnesio	Mg <sup>++</sup>	mg/l	9.3	8.92	55.9	8.92	34.8	34.34	1.2	1.48
Sodio	Na <sup>+</sup>	mg/l	< 10	<10	2390	<10	50.1	49.8	<10	< 10
potasio	K <sup>+</sup>	mg/l	3.3	2.64	17	2.64	8.87	11.3	0.723	0.128
Manganeso		mg/l	< 0.05	<0.5	<0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05
<b>Aniones</b>										
Carbonatos	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	mg/l	0	0	0	0	0	0	3.02	0
Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	116	117	55.7	117	15.3	34.4	<1.06	< 1.06
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/l	10	13.5	64	13.5	145	140	<5.44	< 5.44
<b>Sulfatos</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></b>	<b>mg/l</b>	<b>38.3</b>	<b>36.8</b>	<b>5168</b>	<b>36.8</b>	<b>411</b>	<b>364</b>	<b>0.24</b>	<b>0.1</b>
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0.506	0.392	1.38	0.392	1.35	1.61	<0.918	3.86
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>(3-)</sup>	mg/l	< 0.918	<0.918	< 0.918	<0.918	10.62	10.28	<1.44	
<b>Materia Orgánica</b>										
Oxidable biológicamente	DBO	mg/l	< 0.58	<0.58		<0.58	2	< 0.58	0.67	
Oxidable químicamente	DQO	mg/l	8.4	8.23	16.8	8.23	33.9	26	15	
<b>Parámetros Microbiológicos</b>										
Coliformes fecales (CF)		NMP/100 ml	240	3		<3	210	<3	<3	
Mesófilos aerobios		UFC/ml	49,000	13		13	710,000	13	3	
Algas		(No. org/ml)	0	0				5,000	No Detectadas	

NMP: número más probable; UFC: unidades formadoras de colonias

Fuente: IMTA (2014)

El influente de la planta convencional presenta una calidad de agua semejante a la del influente de la unidad de CC. Al comparar los parámetros fisicoquímicos de conductividad, SDT, dureza y

alcalinidad totales, se observó que hay poca variación entre los resultados de las dos plantas. Sin embargo, el agua superficial contiene cierta cantidad de bacterias que se encuentran ausentes en el agua de pozo. Para disminuir las impurezas, el agua superficial es sometida a un pretratamiento.

En las unidades desmineralizadoras, la cantidad de SDT es de 8,547 mg/l, y la conductividad es de 9.938 dS/m (9,938  $\mu$ S/cm), indicando con ello una gran cantidad de sales, que se presentan en forma de iones de sulfatos (5,168 mg/l) y de sodio (2,390 mg/l). Estos resultados sugieren que la regeneración de las resinas es a base de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, como en la planta de CC.

En el sistema de enfriamiento se tomaron tres muestras. La calidad del agua de repuesto presenta un ligero incremento en la conductividad, por el aumento de los SDT; el incremento en la dureza total se debe al aumento de la dureza por calcio y a la disminución de la dureza por magnesio. Los parámetros microbiológicos se mantienen en los mismos niveles que los presentados en el agua de pretratamiento.

Con respecto a la muestra tomada en la recirculación del sistema de enfriamiento, se observa un incremento substancial en la conductividad con respecto a la conductividad del agua que entra al sistema de repuesto (de 0.347 a 1.294 dS/m), reflejado también en el aumento de los SDT (de 227 a 990 mg/l). La alcalinidad disminuye de 95.6 mg/l  $\text{CaCO}_3$  en el pretratamiento a 12.6 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , y se incrementa la dureza total por calcio y magnesio, de 110 a 429 mg/l  $\text{CaCO}_3$  y de 30 a 139 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente. Hay que recordar que este incremento en los parámetros se debe a la recirculación que tiene el agua en el sistema. En la planta de nuestro estudio, el ciclo de concentración era de tres veces, y en esta planta es casi de cuatro veces la concentración de sales.

Se incrementan los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y los aniones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{PO}_4^{(3-)}$  y, ligeramente, los de  $\text{NO}_3^-$ .

Dado el incremento de temperatura que hay en el sistema, se propicia el crecimiento de microorganismos: 210 NMP/100 ml de coliformes fecales y 7.10E5 UFC/100 ml de mesófilos aerobios.

El exceso de sales del sistema de recirculación se elimina a través de las purgas del sistema. En la muestra tomada de la purga, se observa que la conductividad disminuye ligeramente a 1.27 dS/m, y la cantidad de SDT aumenta a 1,039 mg/l. La alcalinidad por bicarbonatos aumenta a 28.2 mg/l  $\text{CaCO}_3$  y, aunque la dureza total mantiene el mismo valor, la dureza por Ca disminuye a 409 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , mientras que la dureza por Mg aumenta a 159 mg/l  $\text{CaCO}_3$ . Los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  disminuyen ligeramente, y los de  $\text{K}^+$  se incrementan.

En cuanto a los parámetros microbiológicos, las bacterias disminuyen casi en su totalidad, detectándose solamente algas en la muestra (5.0E3 organismos/ml).

Con respecto a la caldera de recuperación–generadora de vapor, se tomaron muestras en el agua de alimentación y la purga.

El agua de alimentación debe contener la menor cantidad de sales para proteger las tuberías y los álabes de la turbina de vapor de las incrustaciones. El agua de entrada a la caldera presenta una

conductividad muy baja (0.028 dS/cm), reflejada en una baja cantidad de SDT (21 mg/l). La alcalinidad y dureza totales también son muy bajas: 3.71 mg/l y 8.75 mg/l, respectivamente. La mayoría de los iones presentan valores menores a los detectables por la técnica analítica. Para los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , se detectaron valores muy bajos (1.5 mg/l y 1.2 mg/l, respectivamente); el valor de los aniones de  $\text{CO}_3^-$  aumentó a 3.02 mg/l, y el de los sulfatos disminuyó a 0.24 mg/l. Con respecto a los parámetros microbiológicos, la cantidad de coliformes fecales está por debajo de los límites detectables, y solamente se presentaron 3 UFC/100 ml de mesófilos aerobios. No se detectaron algas.

La mayoría de los parámetros medidos en la purga de la caldera presenta valores inferiores a los detectados por la técnica analítica. Los parámetros que presentan valores detectables son la conductividad, que es baja, y la dureza total, incrementada por la dureza de Ca y de Mg. El valor de los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$  y de  $\text{Mg}^{2+}$  aumenta, comprobando la efectividad de la aplicación de los compuestos químicos. Los aniones de  $\text{NO}_3^-$  también aumentan. No se presentan valores de parámetros microbiológicos.

Con los resultados del estudio de la termoeléctrica convencional se confirma que la calidad de agua de cada subproceso es diferente y corresponde a lo descrito en la parte teórica.

Gran parte de los compuestos químicos que fueron detectados en las diferentes salidas de la planta convencional estarán presentes, aunque no en la misma cantidad, en las salidas de los subsistemas de la unidad de CC de nuestro estudio.

La importancia de la medición de estos parámetros estriba en conocer los niveles de sales y la contribución a la salinización del cuerpo receptor.

#### **5.4.2 Problemas potenciales por la salinización**

La descarga de la planta de este estudio desemboca en el ramal principal que va a una presa, la cual forma parte de una zona protectora forestal declarada como área natural protegida. Esta presa suministra agua de riego para unas 10,000 hectáreas y, además, en ella se puede pescar carpa y mojarra —tanto para consumo personal como para actividad deportiva-recreativa. Cabe mencionar que esta presa también abastece de agua a la zona industrial aledaña, por lo que es probable que las descargas de esta zona desemboquen en la misma presa.

##### **a) Problemas para el riego**

El principal problema que presenta el agua para riego es la salinidad, es decir, la cantidad total de sales disueltas en el agua.

Los parámetros que se utilizan comúnmente para medir la calidad del agua de riego con respecto a su salinidad son la conductividad eléctrica y los SDT (Agriculturers, 2018).

La Tabla 5.5 muestra los rangos de riesgo de salinidad en función de los SDT y la conductividad.

Tabla 5.5  
Riesgo de salinidad relacionado con los SDT y la conductividad eléctrica del agua

SDT ppm o mg/L	Conductividad dS/m	Riesgo de salinidad
< 500	< 0.8	Bajo
500 – 1000	0.8 – 1.6	Medio
1000 – 2000	1.6 – 3	Alto
> 2000	> 3	Muy alto

Nota: 1 dS/m = 1  $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^6$  (García, 2012a).

Fuente: Tabla tomada de Agriculturers (2018).

De acuerdo con los resultados de calidad del agua de las descargas de la planta en estudio, durante el primer semestre de 2014, los valores de conductividad estuvieron en un rango de entre 900 y 1,400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  —0.9 y 1.4 dS/m—, que corresponden a un nivel de riesgo de salinidad medio. Un riego continuo con este tipo de agua podría provocar la salinización de los suelos, reduciendo la disponibilidad del agua para las plantas y afectando la producción de los cultivos.

En muchos casos, la salinidad o la presencia de iones específicos en el agua de riego producen desbalances nutricionales o deficiencias que causan bajos rendimientos o daños a las plantas.

Los iones que se determinan en un análisis normal de agua para riego son:

- Cationes: calcio, magnesio, sodio, potasio
- Aniones: cloruro, sulfato, bicarbonato, carbonato

Los mayores problemas de toxicidad en vegetales son ocasionados por el cloruro, el sodio y el boro; y en algunas ocasiones, en menor extensión, por magnesio, litio, sulfatos y elementos traza.

El sodio y los sulfatos son los iones que se encuentran en mayor concentración en el agua de salida de las unidades desmineralizadoras de la planta convencional y podrían estar presentes, de igual manera, en la descarga de la planta de estudio, ya que tiene el mismo sistema DM.

La toxicidad por sodio se presenta inicialmente como quemaduras y encrespamiento de las hojas, ocasionando finalmente la muerte de los tejidos intervenales.

Por su parte, el sulfato contribuye a la salinidad del agua de riego junto con los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

Adicionalmente, la presencia del ion sulfato en el agua de riego puede ocasionar corrosión en infraestructuras a base de cemento. El riesgo de corrosión es grande cuando el contenido en sulfatos del agua de riego es del orden de 300 a 400 mg/l (Sosa & Carballo, 2010).

En general, el sulfato no está regulado en la normativa internacional sobre calidad de aguas para riego; sin embargo, como contribuye a la conductividad y a los sólidos disueltos en el agua —parámetros de calidad de aguas que sí están regulados en la normativa internacional—, se pueden

proponer algunos valores de referencia en cuanto a sus efectos, considerando la conductividad (ver Tabla 5.6).

Tabla 5.6  
Correspondencia entre concentración de sulfato y conductividad eléctrica y efectos asociados

Concentración Sulfato (mg/l)	Conductividad Eléctrica µmhos/cm	Afectación
500 – 800	770 – 1,200	Alto nivel de corrosión en tuberías
800 – 1,000	1,200 – 1,500	
1,000 – 1,500	1,500 – 2,300	
1,500 – 2,000	2,300 – 3,100	Efectos adversos a muchos cultivos y métodos de manejo cuidadoso (mmc)
2,000 – 2,500	3,100 – 4,000	Utilizar para plantas tolerantes en suelos permeables con mmc

Fuente: Tabla elaborada con información de Universidad de Chile y Servicio Agrícola y Ganadero (2005).

Nota: 1 µmho/cm = 1 µS/cm (García, 2012a).

En el caso de México, la Ley Federal de Derechos del Agua señala que para usos 1 y 2, —fuentes de abastecimiento para uso público urbano y riego agrícola, respectivamente— el valor establecido es de 250 mg/l de sulfatos. Sin embargo, no hay valores establecidos para los usos 3 y 4, es decir, protección a la vida acuática en agua dulce y aguas costeras, respectivamente (Consultoragua, 2019).

El problema de salinización en suelos provocado por las descargas de las centrales termoeléctricas ya ha sido identificado. El estudio realizado por Villalba Atondo et al. (2013) indica que las descargas de la termoeléctrica ubicada en Agua Prieta contamina moderadamente el río del mismo nombre con sales, arsénico, cadmio y níquel. Otras empresas descargan en el mismo río, contribuyendo a su salinización y provocando que el agua utilizada para el riego afecte a los cultivos forrajeros, bajando su rendimiento. En el suelo se reportan valores de alto riesgo salino y son los que están causando signos de deterioro en las parcelas del Ejido de Agua Prieta. La descarga de la central termoeléctrica se clasifica como moderadamente salina, al presentar una conductividad eléctrica de 9.85 mS/cm o 6,201.6 mg/l de SDT (Clasificación UNESCO 1981 citada en Villalba Atondo et al., 2013). Es importante destacar que los valores de esta clasificación no coinciden con otros valores referidos en la literatura.

Existen soluciones a este problema como, por ejemplo, el proyecto ZERO BRINE de la Unión Europea (TU Delft, s.f.), que consiste en la recuperación de recursos del efluente salino (salmuera) generados por las industrias de procesos a fin de que puedan ser utilizados por otras industrias. Estos recursos incluyen sustancias valiosas como calcio, sodio, magnesio y agua de alta calidad.

Al promover soluciones de modelo comercial de economía circular para la reducción de aguas residuales salinas, este tipo de proyectos «cierra el círculo» y disminuye los impactos ambientales de la producción.

*b) Problemas para la salud humana*

En lo que respecta al agua para consumo humano, la norma NOM-127-SSA1-1994 establece límites para los sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) y los SDT (Secretaría de Salud, 1994); en el caso de los sulfatos, el valor es de 400 mg/l, el cual es menor al establecido por la Organización Mundial de la Salud [OMS] (500 mg/l) y mayor al valor de 250 mg/l que establece la Comunidad Europea (Lenntech, s.f.-d). Con respecto a los SDT, el valor establecido es de 1,000 mg/l; tanto la OMS como la norma europea no fijan ningún valor. Un agua que rebase estos límites puede causar problemas gastrointestinales, los cuales afectan principalmente a lactantes, niños, personas en edad avanzada y personas de salud subyacente, quienes al presentar diarrea prolongada pueden sufrir deshidratación (New Mexico Department of Health, 2007).

Los sulfatos no se remueven durante los procesos convencionales de tratamiento de agua; al contrario, la potabilización con sales de aluminio incrementa su concentración (Jiménez, 2001).

## 6 Propuesta de una guía metodológica

Con base en el estudio realizado, se propone a continuación una guía metodológica que sirva de apoyo para determinar los impactos ambientales ocasionados por la generación de energía eléctrica, desde la perspectiva del ACV y con un enfoque en el consumo de agua y los compuestos químicos que se emplean para su acondicionamiento. Por ser el elemento clave para la generación de energía eléctrica y por los impactos que ocasiona, el combustible también es considerado.

### 6.1 ¿En dónde puedo aplicar esta guía?

La aplicación práctica de la metodología se llevó a cabo en una planta de ciclo combinado; sin embargo, también puede aplicarse a termoeléctricas convencionales y turbogás, o aquellas unidades que presenten un esquema similar en su funcionamiento.

### 6.2 ¿Qué consideraciones se deben tomar en cuenta para determinar los impactos bajo la óptica del ACV?

#### 6.2.1 Para empezar...

En primera instancia, es necesario definir el objetivo del estudio y determinar su alcance y la unidad funcional (etapa 1 del ACV).

El alcance de nuestro estudio se definió de la cuna a la puerta, excluyendo la construcción y el desmantelamiento de la planta, así como la transmisión y la distribución de la energía; sin embargo, es posible considerar estos procesos e incluir otros que sean importantes durante la generación:

- *Upstream*: son todos aquellos procesos que anteceden al proceso principal, por ejemplo, los correspondientes a la extracción, la fabricación, el transporte y el procesamiento de materiales, y la extracción, el procesamiento y la distribución del combustible.
- Sistema del proceso de generación de energía eléctrica: materiales para la operación y mantenimiento de la planta; combustión, emisiones al aire, descargas al agua y los residuos generados durante el proceso.
- *Downstream*: tratamiento de desechos y residuos, la distribución y el consumo de la energía producida y el desmantelamiento de la planta.

#### 6.2.2 Identifica el tipo de tecnología empleada

Las tecnologías de operación de las plantas termoeléctricas poseen características particulares. Por esta razón, será necesario conocer y analizar el proceso de generación de energía eléctrica a fin de identificar las partes principales que lo componen (ver Capítulo 2) y los subprocesos y los materiales que se emplean en cada uno de ellos (ver Capítulo 4).

Una vez comprendido el proceso de generación, será necesario hacer una descripción del sistema producto y elaborar un diagrama de bloques en el que se identificarán las partes que correspondan:

- Componentes: turbina de gas, turbina de vapor, HRSG, y generador.
- Combustible empleado: gas natural, diésel, combustóleo, petcoke o carbón.
- Sistemas y equipos auxiliares: sistema de enfriamiento principal (abierto o de paso único, húmedo de circuito cerrado o torre de enfriamiento, o aerocondensadores), condensador, planta de tratamiento de agua, estación de regulación y medición de gas (ERM) y sistema de vertidos.
- Sistemas que utilizan agua: ciclo de agua-vapor, ciclo de agua de enfriamiento, sellos, desmineralización, servicios generales y contra incendio.
- Tipo de acondicionamiento químico del agua empleada en el proceso.
- Tipo de tratamiento para producir agua desmineralizada.

### 6.2.3 Un poco de ayuda... (diagrama de bloques)

Es importante representar el sistema en estudio a través de un diagrama de bloques. Se propone un diagrama general (ver Figura 6.1), en el que se identifican las siguientes partes:

- La unidad turbogás (ciclo Brayton) está enmarcada en verde.
- La planta convencional o clásica (ciclo Rankine) está enmarcada en guinda.
- El sistema de enfriamiento.
- Las plantas de tratamiento de agua desmineralizada: Intercambio Iónico y/u Ósmosis inversa.
- Las entradas y salidas del agua dentro del sistema, incluyendo las correspondientes para los servicios generales de la planta (áreas verdes y oficinas) y para el sistema contra incendio.
- Los procesos en donde se emplean compuestos químicos (limpieza del sistema de enfriamiento, limpieza y regeneración de resinas, y acondicionamiento de agua).

Dependiendo de la tecnología empleada y del tipo de planta de tratamiento de agua, el diagrama podrá ser modificado y adaptado a la tecnología en estudio. En el caso de una unidad de ciclo combinado, en donde los gases calientes, producto de la combustión del gas natural, salen de la turbina de gas y se dirigen al HRSG, este flujo se identificaría con una línea discontinua roja (ver Figura 4.12 en el Capítulo 4).

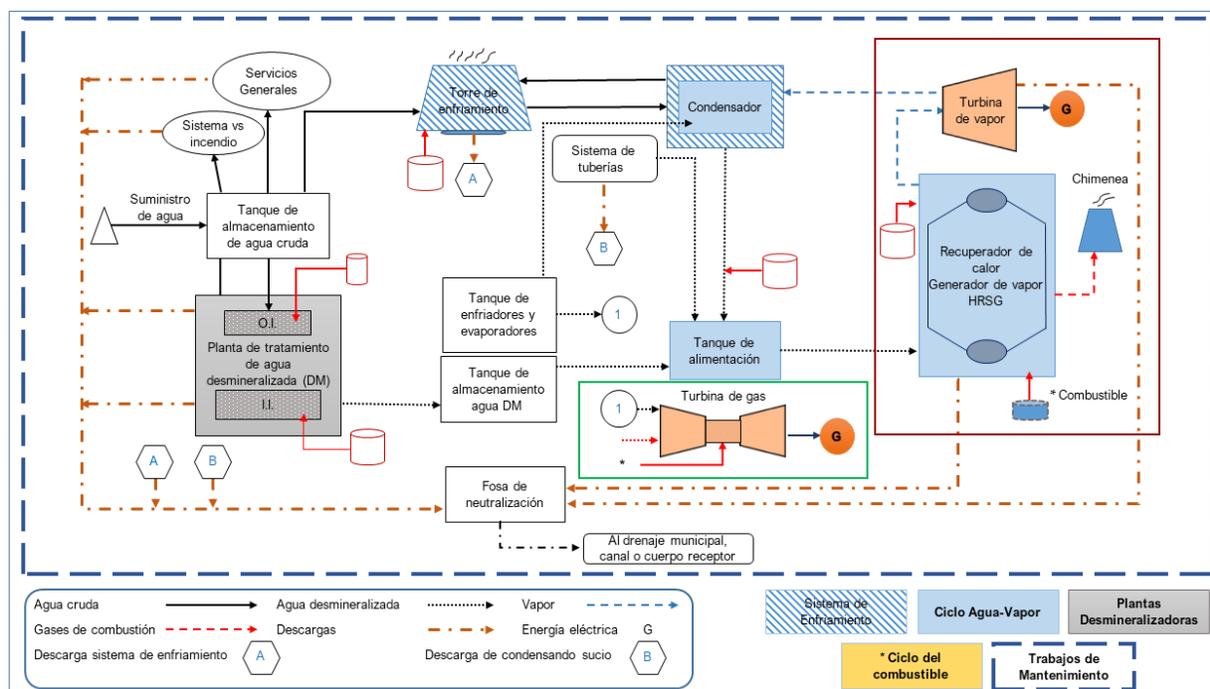


Figura 6.1 Diagrama de bloques general que representa una unidad turbogás, una planta convencional y los sistemas auxiliares.

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.4 ¿Qué debo considerar para el análisis del inventario (etapa 2)?

Una vez que se identifican los principales componentes de la planta, hay que determinar las entradas (materia prima y energía) y salidas (productos, subproductos, descargas al agua y desechos al suelo) de cada uno de ellos.

La representación gráfica de estos elementos (ver Capítulo 4) sirve de base para determinar aquellos que formarán parte del inventario, es decir, los elementos relacionados con el recurso agua —químicos empleados, consumos de agua y descargas.

Como criterio de selección para los químicos se considera no solo los de mayor consumo, sino también los de mayor toxicidad, independientemente de la cantidad consumida.

Algunas veces no es posible obtener toda la información necesaria para realizar el análisis. Para suplir la carencia de datos y elaborar un estudio lo más completo posible, será necesario estimar los datos faltantes u obtenerlos de otros estudios técnicos de plantas bajo la misma tecnología y/o de literatura especializada. Cabe señalar que también algunos procesos *upstream* o *downstream* pueden ser tomados de bases de datos como ecoinvent.

Para conocer los impactos potenciales de los residuos químicos contenidos en las descargas de la central, se recomienda consultar las fichas técnicas de los compuestos químicos empleados, así como buscar resultados de pruebas de toxicología aguda publicados para cada uno de ellos, como los que se han presentado en este trabajo (ver Anexo D).

Las fichas técnicas de los compuestos están disponibles en internet a través de los sitios web de los fabricantes o de organizaciones internacionales como la base de datos de las Fichas Internacionales de Seguridad Química (International Chemical Safety Cards [ICSCs]), publicada por la Organización Internacional del Trabajo (International Labour Organization [ILO]) (ver Anexo D).

La información sobre toxicidad se obtuvo del sitio web de PubChem, una base de datos de sustancias químicas, compuestos y resultados de bioensayos publicada por el Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) de Estados Unidos con fuentes de datos provenientes de 40 países (Kim et al., 2018). Estos resultados nos sirvieron para tener una idea del impacto toxicológico potencial de los compuestos. Sin embargo, cabe señalar que la sensibilidad de las especies a los contaminantes varía en las diferentes áreas geográficas del mundo; por esta razón, a fin de que se cuente con la información más pertinente para la toma de decisiones ambientales, sería importante contar con pruebas de toxicidad específicas para el país o área geográfica en estudio (Ramírez Romero & Mendoza Cantú, 2008).

### 6.2.5 Lo que hay que tomar en cuenta respecto al agua y al combustible

#### a) Agua

- El agua es un elemento indispensable utilizado como fluido de trabajo en las centrales convencionales y las de ciclo combinado y también se emplea en algunos sistemas de enfriamiento.
- La turbina de gas solo utilizará agua si requiere de un sistema de inyección de agua/vapor para reducir la temperatura de combustión y disminuir las emisiones de los NO<sub>x</sub> o para enfriar el aire que entra al compresor.
- Como el ACV está orientado a consumos y acondicionamiento de agua, será necesario realizar un balance de agua de entrada y salidas (ver Sistemas Auxiliares en el Anexo C), cuidando de no duplicar cantidades en el sistema de tratamiento de agua desmineralizada y en los flujos intermedios.
- En caso de utilizar agua de mar para el funcionamiento de la planta, el influente es desalado, y la salmuera es devuelta al mar con las mismas especies químicas de sales, pero más concentrada. El problema de estos vertidos debe tratarse cuidadosamente dependiendo del tipo de proceso utilizado en la desalación y de las características del lugar donde se vierte la salmuera. (Recuero González, 2006).

#### b) Agua DM

Una vez identificado el tipo de tratamiento de agua DM, hay que obtener la siguiente información:

Ósmosis Inversa	Intercambio Iónico
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo está constituido el sistema de membranas?</li> <li>• ¿Cuánta agua DM produce?</li> <li>• ¿Cuál es el volumen del agua de rechazo?</li> <li>• ¿Cuáles son los químicos empleados y en qué cantidad?</li> <li>• ¿Cada cuando se realiza la limpieza de membranas?</li> <li>• Si existe un sistema de pulido, como el lecho mixto de II, ¿cuánto se produce de agua y cada cuándo se regeneran las resinas?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuántos trenes de tratamiento hay?</li> <li>• ¿Qué tipo de resinas se emplea?</li> <li>• ¿Cuál es el volumen de agua DM producido por cada tren?</li> <li>• ¿Cuál es la procedencia de las resinas?</li> <li>• ¿Cada cuándo se sustituyen las resinas?</li> <li>• ¿Cada cuándo se regeneran las resinas?</li> <li>• ¿Qué volumen de agua y cuáles son los químicos empleados para regenerar las resinas?</li> </ul>

### c) Combustible

- Los combustibles más usados son carbón, petróleo, coque de petróleo y gas natural.
- La producción de energía eléctrica está vinculada con las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen al cambio climático. Dependiendo de la composición del combustible empleado, será el impacto en el ambiente.
- Con respecto al ciclo de vida del combustible, habrá que considerar en el inventario las actividades previas a su utilización —extracción, transporte, acondicionamiento y almacenaje (si aplica)—, así como aquellas actividades que emplean técnicas posteriores a la combustión para disminuir la emisión de gases en la salida de la chimenea.
- En lo referente al ACV, para integrar el modelo de la combustión, será necesario considerar la cantidad de combustible empleado, la energía producida y emisiones generadas. El desarrollo de un balance de masa y energía permitirá validar la información de entradas y salidas introducida en el modelo.
- El balance de masa y energía (ver Anexo C) puede ser proporcionado por la misma planta o ser elaborado por cuenta propia a través de una herramienta informática como el Thermoflex<sup>®</sup> (v. 28; Thermoflow Inc.).

El Anexo E muestra algunas de las entradas y salidas que pueden ser consideradas en el inventario.

#### 6.2.6 ¿Qué otra información necesito para completar el inventario?

Lo que no se conoce no se puede medir. Por lo tanto, es importante identificar qué impactos se producen durante la generación de energía eléctrica.

Los impactos al aire, agua y/o suelo dependerán, en primera instancia, del tipo de combustible empleado, del tratamiento que se le dé al mismo antes de ser utilizado —y que estará acorde con el diseño de los quemadores de las calderas—, del tipo de sistema de enfriamiento y de los químicos empleados para acondicionar el agua de alimentación.

A continuación, se proporciona una guía sobre las emisiones, descargas y otros impactos (ver Tablas 6.1 a 6.3) que será necesario considerar para completar el inventario.

Tabla 6.1  
Impactos por tipo de combustible

	Carbón	Petcoke	Diésel	Gas natural
<b>Emisiones a la atmósfera</b>				
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	✓	✓	✓	(inapreciable)
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	✓	✓	✓	(60% de los que emite una planta de carbón)
Material particulado (MP)	✓	✓	✓	(inapreciable)
Monóxido de carbono (CO)	✓	✓	✓	(muy bajas emisiones)
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	✓	✓	✓	(en menor cantidad, casi 40% menos)
Emisiones atmosféricas relacionadas con su transporte y la maquinaria para su operación	✓	✓	✓	
Metales pesados (mercurio, arsénico, cadmio, vanadio, níquel, etc.)	✓	✓		
Halógenos (fluoruro de hidrógeno)	✓	✓		
Hidrocarburos no quemados	✓	✓		
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	✓	✓		
Polvo fugitivo	✓			
<b>Residuos líquidos – Aguas residuales</b>				
Si se usa una torre de enfriamiento → sólidos suspendidos y disueltos en las purgas	✓	✓	✓	✓
Si se usa un sistema abierto de refrigeración → cloro, biocidas u otras sustancias químicas	✓	✓	✓	✓
Sustancias anticorrosivas en las purgas de la caldera	✓	✓	✓	✓
Iones disueltos y exceso de ácido o base en aguas residuales como producto de la regeneración de las resinas en el I.I.	✓	✓	✓	✓
Detergentes y otras sustancias en los alcantarillados y sumideros		✓	✓	✓
Sólidos y metales pesados en las aguas residuales asociadas a las cenizas	✓		✓	
Sulfato de calcio, cloruro de calcio y cloruro de sodio en las purgas del sistema de desulfuración de los gases de combustión	✓			
Sulfato ferroso y ácido sulfúrico en las escorrentías de las pilas de carbón	✓			
Hollín y cenizas volantes en las aguas residuales asociadas a la limpieza de equipos	✓			
Polvo de carbón, detergentes, etc. en los alcantarillados y sumideros	✓			
<b>Residuos sólidos</b>				
Cenizas volantes (80% del total de cenizas)	✓	✓		
Cenizas o escorias de fondo	✓	✓		
Residuos sólidos producidos durante el proceso de desulfuración → yeso (CaSO <sub>4</sub> )	✓	✓		

Fuente: Tabla elaborada con información de la Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas (SMA, 2014).

Cabe mencionar que las etapas de extracción y transporte del combustible también ocasionan impactos. Y en el caso del gas natural, las actividades de exploración, perforación y producción impactan negativamente al ambiente marino (Sánchez Hernández et al., 2009).

Tabla 6.2  
Impactos del sistema de enfriamiento

Consumo de agua y afectación del hábitat acuático (abierto sin recirculación)	Residuos líquidos descargas térmicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de grandes volúmenes de agua</li> <li>• Arrastre de organismos acuáticos pequeños por succión (<i>entrainment</i>)</li> <li>• Colisión de organismos grandes contra los filtros de malla o rejillas del sistema de succión (<i>impingement</i>)</li> <li>• Cloro, biocidas en el agua residual del agua de enfriamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plumas de aguas cálidas en la zona aledaña a la descarga</li> <li>• Daño a organismos sésiles</li> <li>• Reemplazo de comunidades originales por especies oportunistas</li> </ul>

Fuente: Tabla elaborada con información de la Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas (SMA, 2014).

Para dimensionar el impacto de la calidad del agua de la descarga de la planta, se propone realizar una caracterización de las entradas y salidas de cada uno de los sistemas que la componen (ver Anexo E).

Tabla 6.3  
Impactos comunes a todas las centrales

Fuentes de ruido	Sustancias y residuos peligrosos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las bombas, los compresores y los condensadores.</li> <li>• Los ventiladores, sopladores y las conducciones.</li> <li>• Los generadores eléctricos, motores y transformadores.</li> <li>• Las turbinas y sus elementos auxiliares.</li> <li>• Las calderas, los precipitadores electrostáticos y filtros de manga, por golpeo o vibración.</li> <li>• Los elementos auxiliares como los pulverizadores de carbón.</li> <li>• Las torres de enfriamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustancias y residuos peligrosos asociados al manejo de sustancias peligrosas —aceites de recambio, grasas, materiales de mantenimiento (impregnados con aceites y grasas), solventes, baterías y pinturas, entre otros.</li> </ul>

Fuente: Tabla elaborada con información de la Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas (SMA, 2014).

### 6.2.7 Ahora es tiempo de evaluar...

Una vez obtenida la información de entrada y salida, se realiza la asignación de los materiales en masa o en unidades monetarias, de acuerdo con la unidad funcional establecida para el estudio. Posteriormente, estos datos se incorporan a la herramienta informática seleccionada para realizar la evaluación del impacto de ciclo de vida (etapa 3).

En esta etapa, se seleccionará el método y las categorías de impacto de acuerdo con el objetivo del estudio (ver Capítulo 2). Los resultados obtenidos serán los indicadores de las categorías de impacto que afectarán al aire, agua y suelo.

### **6.2.8 Y, por último, es hora de interpretar...**

En esta etapa del ACV, se hace la interpretación de los resultados obtenidos. Se analiza cuáles son las afectaciones al medio ambiente a través de las categorías de impacto y se determina cómo contribuye cada elemento que compone el inventario a cada una de ellas. Se examinan todas las categorías, prestando mayor atención a aquellas que presenten los elementos o procesos de mayor contribución a la categoría. Posteriormente, se investigan las posibles causas de estas contribuciones. Con esta información se proponen cambios o modificaciones para disminuirlas y se plantean nuevos escenarios que vuelven a evaluarse (análisis de sensibilidad). Los nuevos resultados se analizan y se comparan con los resultados anteriores para determinar cuáles aportan los mayores beneficios a nivel económico y ambiental.

Esta guía metodológica pretende facilitar el camino para la determinación de impactos ambientales producidos por plantas termoeléctricas. Es indispensable, para realizar un estudio de ACV, seguir los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044.

## 7 Conclusiones

La contaminación atmosférica provocada por la combustión en plantas termoeléctricas ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este trabajo de investigación, se aplicó esta metodología orientada a determinar los posibles impactos ambientales producidos por el acondicionamiento químico del agua empleada durante el proceso de generación de energía eléctrica en una planta de ciclo combinado (CC).

El proceso se dividió en etapas y en procesos unitarios, los cuales fueron analizados por separado. En cada uno, se identificaron los materiales que tuvieron las contribuciones más altas para las categorías de impacto.

Se obtuvo un mayor conocimiento sobre los impactos ambientales causados por la tecnología de CC, al determinar la Huella Ambiental con el método ReCiPe —el más completo en cuanto a nivel de categorías.

Los resultados mostraron que las categorías más afectadas estaban relacionadas con el aire, el agua y la toxicidad al medio ambiente y a los seres vivos. Estos impactos fueron causados principalmente por la cantidad de gas natural consumido, el volumen de agua extraído y la manufactura y consumo de los compuestos químicos utilizados en el proceso.

El agotamiento de agua fue causado principalmente por el alto consumo del recurso en el sistema de enfriamiento y en el proceso de osmosis inversa.

La toxicidad —de agua dulce, marina, terrestre y humana— se debió, en gran parte, a la manufactura y consumo de los compuestos químicos utilizados. Dentro de los de tipo inorgánico, los impactos se determinaron por producción y toxicidad, siendo la hidracina el compuesto que tiene una mayor contribución en las categorías. Como los compuestos orgánicos no se encontraron en las bases de datos, solamente se analizó su contribución a las categorías de impacto de manera genérica, a través de su producción.

A fin de conocer el impacto por toxicidad en el medio acuático causado por la probable descarga de compuestos orgánicos, se recurrió a las pruebas de toxicidad disponibles. Cabe señalar que, al comparar la información de diferentes fuentes, en algunas ocasiones hubo discrepancias en cuanto al daño que supone un determinado compuesto al medio ambiente. En estos casos, se prefirió errar por precaución y considerar el riesgo más severo.

Los valores de toxicidad reportados en los diferentes niveles tróficos muestran cuan dañinos pueden ser los compuestos químicos empleados. De acuerdo con la información recabada, las dosis letales más pequeñas se registraron en los eslabones tróficos inferiores. No todos los compuestos químicos reportaron valores en estos niveles, y se desconocen sus efectos. Por esta razón, es necesario hacer estudios en toda la cadena trófica, y recordar que «una cadena es tan fuerte como su eslabón más débil».

Otro problema que se genera como resultado del consumo de compuestos químicos es la salinidad en las descargas, la cual podría provocar efectos nocivos en el cuerpo de agua receptor.

Las descargas con contenido de sales, como el encontrado en este estudio, no suelen considerarse como un problema para el medio ambiente puesto que los mismos cuerpos de agua, en algún momento, disuelven estas sales. Sin embargo, hay que recordar que las condiciones de los cuerpos receptores ya no son las mismas. Un alto contenido de sales en estas aguas puede ocasionar corrosión en infraestructuras a base de cemento, problemas en los cultivos y problemas por su consumo.

Por esta razón, es deseable que el efluente final reciba un tratamiento para disminuir estas sales antes de que sean descargadas. Proyectos como el ZERO BRINE de la Unión Europea, en el marco de la iniciativa sobre Economía Circular, son una excelente iniciativa que se está realizando para la recuperación de cuerpos de agua por efluentes salinos.

Un problema frecuente para realizar los estudios de ACV es la falta de información. En este estudio, la falta de modelos para algunos compuestos dificultó la obtención de mejores resultados; debido a que los datos disponibles fueron limitados, se proporciona solo una estimación aproximada de los impactos. Sin embargo, estas primeras aproximaciones aportaron una idea del efecto potencial de los compuestos químicos bajo estudio.

Es necesario realizar una mayor investigación sobre los efectos de estos compuestos químicos — también conocidos como contaminantes emergentes— y que podrían estar presentes a niveles traza en las aguas residuales.

La identificación y cuantificación de compuestos químicos en el medio ambiente y en los seres vivos tiende a pasar a un segundo plano dado el alto costo y la complejidad de los análisis. Aun así, es indispensable crear modelos para determinar los impactos ambientales de estos compuestos a fin de implementar medidas orientadas a disminuir los daños a los ecosistemas.

Con la creación de bases de datos más robustas y la inclusión de pruebas de toxicidad específicas para la zona de estudio, los resultados obtenidos al aplicar la metodología del ACV podrían proporcionar una imagen más completa del impacto ambiental de estas sustancias.

Esta investigación es una pequeña contribución para lograr la meta seis de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), que hace referencia a mejorar la calidad del agua disminuyendo la contaminación, eliminando los vertimientos y reduciendo la emisión de productos químicos para proteger y restablecer los ecosistemas acuáticos.

Aprovechando la experiencia adquirida durante este estudio, se propone una guía metodológica que proporciona los puntos clave para determinar los impactos ambientales orientados a la calidad de agua, con base en el ACV. Esta guía incluye un diagrama de bloques que muestra las principales entradas y salidas de los procesos unitarios considerados durante la generación de energía eléctrica. Por la versatilidad de su diseño, este diagrama puede ser adaptado a otras tecnologías que presenten una estructura similar a la del ciclo combinado.

La finalidad de esta guía es que sirva como una herramienta para identificar materiales de mayor consumo y toxicidad por etapa y/o proceso. De esta manera, a nivel operativo, se buscarían alternativas que mejoraran la eficiencia de los procesos utilizando compuestos químicos para el acondicionamiento del agua que fueran menos dañinos y, así, reducir los impactos ambientales.

Agua y energía son dos insumos estrechamente vinculados. El agua es esencial para sostener la vida y, junto con la energía, constituye un recurso vital para el desarrollo económico. La amenaza de una escasez de agua pone de manifiesto la necesidad de una gestión más eficiente y responsable del recurso hídrico para las actividades económicas, la salud de la población y de los ecosistemas acuáticos dentro de un marco de sostenibilidad.

Para el 2032, se incrementará la demanda de agua y energía en México, y se seguirán construyendo plantas de CC debido a su alta eficiencia. Por esta razón, es imprescindible proteger nuestros recursos hídricos e implementar nuevas políticas públicas destinadas a alcanzar eficiencia energética en la producción, crear conciencia sobre la importancia del consumo responsable de la energía y promover el desarrollo de tecnologías innovadoras para el tratamiento de agua.

Al hacer evidente el impacto de compuestos químicos que pueden formar parte de las descargas y que aún no han sido normados, estudios como éste pueden contribuir al diseño de nuevas políticas públicas en materia de normatividad ambiental. Además, también pueden servir para promover prácticas de ecoeficiencia en este tipo de plantas.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del ACV pueden ayudar a los productores de energía a comparar diferentes tecnologías y seleccionar aquellas que generen menores impactos en el ambiente y en la sociedad, al tiempo que proporcionen un beneficio económico.

Por otro lado, los impactos detectados representan una pérdida de bienestar social y un uso ineficiente de los recursos debido a que como las externalidades no están internalizadas, el precio de la energía eléctrica no refleja su costo real. Por esta razón, estas externalidades deben ser cuantificadas y, posteriormente, se les debe asignar un valor económico. Este podría ser un tema para futuros proyectos de investigación.

El ACV es sin duda una herramienta poderosa cuya aplicación va más allá de la determinación de impactos ambientales. Aunque conlleva un valor particular de incertidumbre, proporciona los medios para analizar diferentes escenarios a fin de encontrar alternativas que disminuyan esos impactos. Además, su uso se está extendiendo por la adopción del enfoque de ciclo de vida en la producción de bienes y servicios.

## Referencias

- Acero, A. P., Rodríguez, C. & Ciroth, A. (2015). *LCIA Methods – Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories*. Recuperado de <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>
- Aeroqual. (2020). A Beginner's Guide to NO<sub>x</sub>, NO and NO<sub>2</sub> as Air Pollutants. Recuperado de <https://www.aeroqual.com/meet-the-nitrogen-oxide-family>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (s.f.). *ToxFAQs™ - Hidracina, 1,1 dimetilhidracina, y 1,2 dimetilhidracina (Hydrazine, 1,1 – Dimethylhydrazine, and 1,2 – Dimethylhydrazine)*. Recuperado de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts100.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts100.html)
- Agrawal, K. K., Jain, S., Jain, A. K., & Dahiya, S. (2014). A life cycle environmental impact assessment of natural gas combined cycle thermal power plant in Andhra Pradesh, India. *Environmental Development*, 11, 162–174. doi: 10.1016/j.envdev.2014.04.002
- Ågren, N. D., Westermarck, M. O., Bartlett, M. A., & Lindquist, T. (2002). First Experiments on an Evaporative Gas Turbine Pilot Power Plant: Water Circuit Chemistry and Humidification Evaluation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 124(1), 96–102. doi: 10.1115/1.1397778
- Agriculturers. (2018). La calidad del agua de riego. Recuperado de <https://agriculturers.com/la-calidad-del-agua-de-riego/#:~:text=La%20calidad%20del%20agua%20de%20riego%20tambi%C3%A9n%20puede%20ser,la%20toxicidad%20de%20iones%20espec%C3%ADficos.&text=Los%20iones%20m%C3%A1s%20comunes%20que,su%20susceptibilidad%20a%20estos%20iones>.
- Aguilar, R. M. (1981) *Criterios de diseño de plantas termoeléctricas*. Ciudad de México: Ed. Limusa.
- Albiano, N. & Villaamil Lepori, E. (2015). *Toxicología laboral: Criterios para el monitoreo de la salud de los trabajadores expuestos a sustancias químicas peligrosas*. Recuperado de [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/toxicologia\\_laboral\\_0.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/toxicologia_laboral_0.pdf)
- Aranda, A., Zabalza, I., Martínez, A., Valero, A., & Scarpellini, S. (2006). *El análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial*. Madrid: Fundación Confemetal.
- Ashland Water Technologies. (2013). *Water Treatment Chemistry Program Administration Manual*. Barney Davies Facility.
- Asociación Española de Toxicología. (1995). *Glosario de términos usados en toxicología. Recomendaciones de la IUPAC 1993. Versión española. AET-1995*. Recuperado de <http://busca-tox.com/05pub/Glosario%20terminos%20toxicologicos%20toxicologia%20Repetto.pdf>

- Aves Argentinas. (5 enero 2017). La energía eólica, las aves y el ambiente. Recuperado de <https://www.avesargentinas.org.ar/noticia/la-energ%C3%ADa-e%C3%B3lica-las-aves-y-el-ambiente>
- Aymard, V. & Botta-Genoulaz, V. (2016). *Normalization in Life Cycle Assessment: consequences of new European factors on decision making*. Artículo presentado en la 6<sup>th</sup> International Conference on Information Systems, Logistics and Supply-chain. ILS Conference 2016, June 1 – 4, Bordeaux, France. Recuperado de [http://ils2016conference.com/wp-content/uploads/2015/03/ILS2016\\_WD04\\_5.pdf](http://ils2016conference.com/wp-content/uploads/2015/03/ILS2016_WD04_5.pdf)
- Badia Villas, D. (1992). Suelos afectados por Sales. *Butlletí de les Societats Catalanes de Ciències, Vol. XIII*, 609–629. Recuperado de <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000120/00000090.pdf>
- Becerril, B. E. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Rev. Digital Universitaria*, 10(8). Recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54-2.htm>
- BS Consultores. (2007). *Elaboración de guía orientadora para la evaluación ambiental de centrales termoeléctricas. Informe Final v.3*. Recuperado de [http://dataset.cne.cl/Energia\\_Abierta/Estudios/CNE/Gu%C3%ADa%20orientadora%20para%20evaluaci%C3%B3n%20ambiental%20de%20centrales%20termoele%C3%A9ctricas.pdf](http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/CNE/Gu%C3%ADa%20orientadora%20para%20evaluaci%C3%B3n%20ambiental%20de%20centrales%20termoele%C3%A9ctricas.pdf)
- Brizmohun, R., Ramjeawon, T., & Azapagic, A. (2015). Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 106, 565–575. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.033
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Burdige, J. R. (2004). *Química: la ciencia central* (9th ed.). México: Pearson Educación.
- Caldés, N., Lechón, Y., de la Rúa, C., & Herrera, I. (2017). Cuantificación preliminar de externalidades de la producción de biodiesel en Uruguay. Recuperado de [https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/06\\_-\\_externalidades\\_biodiesel\\_alur\\_version\\_final.pdf](https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/06_-_externalidades_biodiesel_alur_version_final.pdf)
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. España: Ediciones Díaz de Santos. ISBN: 9788479786946. Recuperado de <https://books.google.ca/books?id=KBTPxLi6IRsC>
- Cengel Y. A. & Boles, M. A. (2011). Vapor and Combined Power Cycles. En *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York, NY: Mc Graw-Hill.
- Centro Científico Tecnológico (CCT) CONICET Mendoza. (s.f.). Ensayos de toxicidad. Recuperado de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Ensayosde.htm>
- ChemSrc. (s.f.). Tolyltriazole. Recuperado de [https://www.chemsrc.com/en/cas/29385-43-1\\_832454.html#ebiemingDiv](https://www.chemsrc.com/en/cas/29385-43-1_832454.html#ebiemingDiv)

- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2012). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico (COPAR Generación 2012)*. Recuperado de [https://www.greenfinancelac.org/wp-content/uploads/2016/10/Costos\\_y\\_Parametros\\_de\\_Referencia\\_para\\_la\\_Formulacion\\_de\\_Proyectos\\_de\\_Inversion.pdf](https://www.greenfinancelac.org/wp-content/uploads/2016/10/Costos_y_Parametros_de_Referencia_para_la_Formulacion_de_Proyectos_de_Inversion.pdf)
- (2014). *Informe Anual 2014*. Recuperado de <http://aplicaciones.cfe.gob.mx/Aplicaciones/OTROS/InformeAnualConFirmas2014.pdf>
- (2015). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico (COPAR Generación 2015)*. Recuperado de <http://www.cofemersimir.gob.mx/expediente/21542/mir/45107/anexo/4368846>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Estadísticas del agua en México - Edición 2017*. Recuperado de [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/EAM\\_2018.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/EAM_2018.pdf)
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). (2011). *Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte*. Recuperado de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/10236-north-american-power-plant-air-emissions-es.pdf>
- Consultoragua. (2019). *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2019 Conforme al Anexo 19 de la Resolución Miscelánea Fiscal para 2019, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de diciembre de 2018*. Recuperado de [http://consultoragua.com/documentos/LFD\\_Disposiciones\\_en\\_Materia\\_de\\_Aguas\\_2019.pdf](http://consultoragua.com/documentos/LFD_Disposiciones_en_Materia_de_Aguas_2019.pdf)
- D'Addario, M. (2018). *Tecnología industrial: Fundamentos, desarrollo y cálculos*. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=Il1QDwAAQBAJ>. ISBN=9780244672881
- Daughthon, C. G. (2004). Non-regulated water contaminants: emerging research. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7-8), 711-732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.003>
- Dinca, C., Rousseaux, P. & Badea, A. (2007). A life cycle impact of the natural gas used in the energy sector in Romania. *Journal of Cleaner Production*, 15(15), 1451-1462. doi: 10.1016/j.jclepro.2006.03.011
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2002). *Water & Sustainability (Vol. 3): U.S. Water Consumption for Power Production – The Next Half Century*. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Recuperado de <https://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2010/08/EPRI-Volume-3.pdf>
- (2013). *Comprehensive Cycle Chemistry Guidelines Combined Cycle/Heat Recovery Steam Generators (HRSGs)* (Product Abstract).

- European Commission Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability (JRC-IES). (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment*. First edition. Recuperado de <https://epilca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>
- European Chemicals Agency (ECHA). (s.f.). Hydroxyphosphonoacetic acid. Recuperado de <https://echa.europa.eu/es/brief-profile/-/briefprofile/100.100.728>
- Facultad de Química-UNAM. (s.f.). *Hoja de Seguridad II-Hidróxido de Sodio*. Recuperado de <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/2hsnaoh.pdf>
- Feliciano, G. & Martínez, J. L. (1977). *Diseño de una planta desmineralizadora para el agua de repuesto a calderas de alta presión*. (Tesis). UNAM, Facultad de Química, México.
- Ferat Toscano, C., Martin-Del-Campo, C., Moeller-Chavez, G., Santos, G. L., François, J., & Revollo Fernandez, D. (2019). Life Cycle Assessment of a Combined-Cycle Gas Turbine with a Focus on the Chemicals Used in Water Conditioning. *Sustainability*, 11(10), 2912. doi:10.3390/su11102912
- Fernandes, T. G. (2014). *Efeito da ciclohexilamina sobre trofozoítos de Giardia lamblia* (Tesis de maestría). Fundação Oswaldo Cruz, Centro de Pesquisas Gonçalo Moniz, Salvador.
- Freeman, H. (1998). *Manual de prevención de la contaminación industrial*. Cd de México: McGraw Hill.
- García, A. (junio 2012a). Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego (Primera parte). Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/B3BD6ED103283DDD85257A2F005EF91B/\\$FILE/6%20Art.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/B3BD6ED103283DDD85257A2F005EF91B/$FILE/6%20Art.pdf)
- García, G. S., Ratia, G. P. & Perea, S. J. (2008). *Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. & van Zelm, R. (2013). *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation*. Recuperado de <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>
- Golsteyn, L. (10 julio 2014). The Characterisation Step in LCIA. PRé Sustainability. Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/news/characterisation-new-developments-for-toxicity>
- GreenDelta. (s.f.). openLCA – The world's leading, high performance, open source Life Cycle Assessment software. Recuperado de <http://www.openlca.org/>
- GuideChem. (s.f.). Tolyltriazole. Recuperado de <https://www.guidechem.com/encyclopedia/Tolyltriazole-dic344605.html#Safety>

- Guinée, J.B. (Ed.). (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Government of Canada, P.W. (s.f.). Termium Plus®: The Government of Canada's Terminology and Linguistic Data Bank. Recuperado de <https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-eng.html?lang=eng>
- Herranz-García, S. & García-Navarro, J. (2018). *Figura 2. Etapas de un ACV. UNE-EN ISO 14040:2006* [Imagen digital]. Recuperado de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Etapas-de-un-ACV-UNE-EN-ISO-140402006\\_fig1\\_323128059](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Etapas-de-un-ACV-UNE-EN-ISO-140402006_fig1_323128059)
- Hitchcock, D., Savelski, M. J. & Slater C. S. (2011). *Life Cycle Assessment* [Imagen digital]. Glassboro, N.J.: Rowan University, Department of Chemical Engineering. Recuperado de <https://pharmahub.org/resources/503/supportingdocs>
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30(11-12), 2042–2056. doi: 10.1016/j.energy.2004.07.020
- Honeywell. (2012). *Power Plant Feedwater Treatment* (Solution Note). Houston, TX: Honeywell.
- Hoof, B. V., Monroy, N. & Saer, A. (2008). *Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Icopal. (s.f.). Nitrogen Oxide (NO<sub>x</sub>) Pollution. Recuperado de <http://www.icopal-noxite.co.uk/nox-problem/nox-pollution.aspx>
- Industrias EMU S.A. (s.f.). Fosfato disódico anhidro.
- InfoAgro Systems. (s.f.). Conductividad eléctrica. Recuperado de [https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/doc\\_conductividad\\_electrica.asp?k=53](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53)
- Instituto de Ecología (IE) & Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2003). *Manifiesto de impacto ambiental. Modalidad particular. Unidad Turbogás San Lorenzo, Puebla, 2003*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/pue/estudios/2003/21PU2003E0001.pdf>
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC). (2008a). NMX-SAA-14040-IMNC-2008 Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y Marco de Referencia.
- (2008b). NMX-SAA-14044-IMNC-2008 Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Requisitos y Directrices.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2014). *Informe del proyecto "Recuperación de purgas provenientes de torres de enfriamiento, sistemas de generación de vapor y UDAS, propuesta para Pemex-Gas". Convocatoria SENER-CONACYT-HIDROCARBUROS. Proyecto de investigación y desarrollo 2010-2013*.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) & Comisión Nacional del Agua (CNA). (s.f.-a). Análisis de toxicidad en el agua (Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, segunda parte). Recuperado de <http://201.116.60.182/conagua07/Noticias/AnalisisDeToxicidad.pdf>
- (s.f.-b). *Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales* (Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua). Recuperado de [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/07/fundamentos\\_tecnicos.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/07/fundamentos_tecnicos.pdf)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) & Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. En México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164241/2a\\_parte.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164241/2a_parte.pdf)
- (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexbur1.pdf>
- (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Recuperado de [https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/69287541\\_Mexico-BUR2-NC6-2-MEXNIR\\_Revisada.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/69287541_Mexico-BUR2-NC6-2-MEXNIR_Revisada.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Sistema de cuentas nacionales de México: cuentas económicas y ecológicas de México 2013. Preliminar: año base 2008*. Ciudad de México: INEGI.
- Instituto para la Salud Geoambiental. (s.f.). Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. Recuperado de <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>
- International Energy Agency (IEA). (2012). World Energy Outlook 2012–Executive Summary. Recuperado de [www.worldenergyoutlook.org](http://www.worldenergyoutlook.org)
- International Labour Organization (ILO). (2003). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Ciclohexilamina. Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0245&p\\_version=2](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0245&p_version=2)
- (2005). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Sulfato de sodio. Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0952&p\\_version=2](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0952&p_version=2)
- (2009). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Hidracina. Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0281&p\\_version=2](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0281&p_version=2)

- (2010). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Hidróxido de sodio. Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0360&p\\_version=2](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0360&p_version=2)
- (2015). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Fosfato de trisodio (anhidro). Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=1178&p\\_version=2](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=1178&p_version=2)
- (2016). Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) – Ácido sulfúrico, concentrado (> 51% y < 100%). Recuperado de [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=362&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=es](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=362&p_edit=&p_version=2&p_lang=es)
- IRO Group Inc.(s.f.). Inhibidor de la corrosión – Toliltriazol (TTA). Recuperado de <https://www.irooildrilling.com/span/Corrosion-Inhaborator/TTA.htm>
- Jiménez, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México: Ed. Limusa.
- Kenny, S. & Pope, D. (2000). Basic Water Treatment of Steam Boilers. [PDF]. Chemco Water Technology. Vancouver, WA: Western Dry Kiln Association. Recuperado de [https://www.academia.edu/39156398/BASIC\\_WATER\\_TREATMENT\\_OF\\_STEAM\\_BOILERS](https://www.academia.edu/39156398/BASIC_WATER_TREATMENT_OF_STEAM_BOILERS)
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Aravaca, Madrid: McGraw-Hill.
- Kim, S., Chen, J., Cheng, T., Gindulyte, A., He, J., He, S., Li, Q., Shoemaker, B.A., Thiessen, P.A., Yu, B., Zaslavsky, L., Zhang, J. & Bolton, E.E. (29 octubre 2018). PubChem 2019 update: improved access to chemical data. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6324075/>
- Kurita Water Industries Ltd. (Kurita). (1999). *Kurita Handbook of Water Treatment* (2da ed.). Shinjuku-ku, Tokyo: Kurita Water Industries Ltd.
- Laurent, A., Espinosa, N. & Hauschild, M. Z. (2018). LCA of Energy Systems. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3\_26
- Lelek, L., Kulczycka, J., Lewandowska, A., & Zarebska, J. (2016). Life cycle assessment of energy generation in Poland. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 1–14. doi: 10.1007/s11367-015-0979-3
- Lenntech. (s.f.-a). Agua desionizada/desmineralizada. Recuperado de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/proceso/desmineralizada/agua-desionizada-desmineralizada.htm>
- (s.f.-b). Características del Agua de Calderas. Recuperado de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/proceso/caldera/agua-de-calderas-caracteristicas.htm>

- (s.f.-c). Desinfectantes – Hipoclorito de sodio. Recuperado de <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-hipoclorito-de-sodio.htm>
- (s.f.-d). Sulfatos. Recuperado de <https://www.lenntech.es/sulfatos.htm>
- Ley de la Industria Eléctrica, art.3 DOF 11-08-2014 fracción XXII. (2014). Recuperado de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec\\_110814.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec_110814.pdf)
- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, art. 36 BIS DOF 09-04-2012 capítulo V. (2012). Recuperado de [https://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/marco\\_LSPEE.pdf](https://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/marco_LSPEE.pdf)
- Macknick, J., Newmark, R., Heath, G. & Hallett, K. C. (2011). *Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies*. Golden, CO: National Renewable Energy Lab (NREL). doi:10.2172/1009674
- Maquimex. (s.f.). *Las isotiazolinonas y su función en desinfección*. Recuperado de <https://maquimex.com/blog/las-isotiazolinonas-y-su-funcion-en-desinfeccion>
- (20 de marzo de 2012). Ficha Técnica: MAQUINHIB WT (THPS 75%) (AQUCAR THPS). Recuperado de <https://www.maquimex.com/archivos/general/FT-MAQUINHIBWT.pdf>
- (15 de julio de 2014). Ficha Técnica: HPAA (Ácido Hidroxifosfonoacético). Recuperado de <https://www.maquimex.com/archivos/general/FT-HPAA.pdf>
- (25 de febrero de 2015a). Ficha Técnica: Kathon WT 1.5%. Recuperado de [https://www.maquimex.com/archivos/general/FT-Kathon\\_WT.pdf](https://www.maquimex.com/archivos/general/FT-Kathon_WT.pdf)
- (10 de abril de 2015b). Ficha Técnica: Aqucar DBNPA 20%. Recuperado de <https://www.maquimex.com/archivos/general/FT-DBNPA.pdf>
- Marcó, J. (2001). Tratamientos del agua en torres de refrigeración. Prevención de *legionella*. En *Montajes e Instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, Año 31, Núm. 347, pp. 81–88. Recuperado de <https://es.slideshare.net/testgrupocomex/tratamientos-del-agua-en-torres-de-refrigeracin>
- Meijer, E. (29 de septiembre de 2014). *Weighting: Applying a Value Judgement to LCA Results*. Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/news/weighting-applying-a-value-judgement-to-lca-results/>
- Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G. & Macknick, J. (2013). Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environmental Research Letters*. 8(1). doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015031
- Mertens, J., Prieur-Vernat, A., Corbisier, D., Favrot, E. & Boon, G. (2015). Water footprinting of electricity generated by combined cycle gas turbines using different cooling technologies: a practitioner's experience. *Journal of Cleaner Production*, 86, 201–208. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.046

- Michaelides, E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.  
doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2>
- Ministerio de Sanidad y Política Social (MSPS). Gobierno de España. (2009). Guía de desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Recuperado de [https://www.mscbs.gob.es/en/profesionales/saludPublica/docs/Guia\\_desalacion.pdf](https://www.mscbs.gob.es/en/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf)
- Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSST). (2019). *Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España*. Recuperado de <https://www.insst.es/documents/94886/188493/L%C3%ADmites+de+exposici%C3%B3n+profesional+para+agentes+qu%C3%ADmicos+2019/7b0b9079-d6b5-4a66-9fac-5ebf4e4d83d1>
- (s.f.). *NTP 244: Criterios de Valoración en Higiene Industrial*. Recuperado de [https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp\\_244.pdf/b853aaf2-955b-41d7-b021-7bd702ecdd9d#:~:text=Los%20valores%20MAK%20se%20definen,trabajadores%20ni%20causar%C3%A1n%20molestias%20indebidas.](https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_244.pdf/b853aaf2-955b-41d7-b021-7bd702ecdd9d#:~:text=Los%20valores%20MAK%20se%20definen,trabajadores%20ni%20causar%C3%A1n%20molestias%20indebidas.)
- National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). (2011). LCIA: The ReCiPe model. Recuperado de <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- New Jersey Department of Health. (s.f.). Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas – Metano. Recuperado de <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1202sp.pdf>
- New Mexico Department of Health. (2007). *Sulfate in Drinking Water*. Recuperado de <https://www.nmhealth.org/publication/view/help/291/>
- Nowack, B. (2003). Environmental Chemistry of Phosphonates. *Water Research*, 37(11), 2533-2546. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00079-4)
- OPEXenergy. (s.f.). Ciclos Combinados: Principios de la Turbina de Gas. Recuperado de [http://www.opex-energy.com/ciclos/principios\\_de\\_Gas\\_CTCC.html](http://www.opex-energy.com/ciclos/principios_de_Gas_CTCC.html)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2014). AQUASTAT. Recuperado de [http://www.fao.org/NR/Water/aquastat/countries\\_regions/MEX/printesp1.stm](http://www.fao.org/NR/Water/aquastat/countries_regions/MEX/printesp1.stm)
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2014). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014: agua y energía, resumen ejecutivo*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962S.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (s.f.). Cambio climático y salud humana. Recuperado de <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/es/>

- Ormazabal, M., Jaca, C., & Puga-Leal, R. (2014). Analysis and Comparison of Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Software. In Xu, J., Cruz-Machado, V.A., Lev, B., Nickel, S. (Eds.), *Proceedings of the Eighth International Conference on Management Science and Engineering Management* (pp. 1521–1530). doi: 10.1007/978-3-642-55122-2\_131
- PCE Instruments. (s.f.). Definición de la calidad del aire y del CO<sub>2</sub>. Recuperado de <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/definicion-calidad-aire-y-co2.htm>
- Ponsioen, T. (21 de julio de 2014). *Normalisation: New Developments in Normalisation Sets*. Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/news/the-normalisation-step-in-lcia/>
- PRé Consultants. (s.f.-a). ReCiPe. Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/recipe>
- (s.f.-b). SimaPro. Recuperado de <https://simapro.com/about/>
- (2014). SimaPro v. 8.0.4.30. System for Integrated Environmental Assessment for Products [Software].
- (2018). SimaPro Database Manual – Methods Library. Recuperado de <https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual>
- PubChem. (s.f.-a). 2,2-Dibromo-2-cyanoacetamide. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/25059#section=Non-Human-Toxicity-Values>
- (s.f.-b). 2-Methyl-4-isothiazolin-3-one. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/39800#section=Non-Human-Toxicity-Values>
- (s.f.-c). 4-Methyl-1H-benzotriazole. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/122499>
- (s.f.-d). Cyclohexylamine. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7965#section=Reported-Fatal-Dose>
- (s.f.-e). D-Limonene. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/440917#section=Ecotoxicity-Values>
- (s.f.-f). Diethyl (3-bromopropyl) phosphonate. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/283500>
- (s.f.-g). Disodium hydrogen phosphate. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24203#section=Acute-Effects>
- (s.f.-h). Hydrazine. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/9321#section=Non-Human-Toxicity-Values>
- (s.f.-i). Hydroxyphosphonoacetic acid. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydroxyphosphonoacetic-acid>

- (s.f.-j). Sodium hydroxide. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798>
- (s.f.-k). Sodium hypochlorite. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23665760>
- (s.f.-l). Sodium sulfate. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24436>
- (s.f.-m). Sulfuric acid. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1118>
- (s.f.-n). Tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium sulfate. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/41478#section=Ecotoxicity-Values>
- (s.f.-o). Trisodium phosphate. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24243#section=Non-Human-Toxicity-Values>
- Purolite International. (2003). *Guidelines for selecting resin ion exchange or reverse osmosis for feed water demineralization*. Recuperado de [https://docuri.com/download/equip\\_59c1d6c6f581710b2866e482\\_pdf](https://docuri.com/download/equip_59c1d6c6f581710b2866e482_pdf)
- QuimiNet.com. (2012). Los fosfonatos y sus usos industriales. Recuperado de <https://www.quiminet.com/articulos/los-fosfonatos-y-sus-usos-industriales-2707323.htm>
- Quiminsa – Químicos Industriales S.A. (s.f.). *Ficha de Seguridad del Hipoclorito de Sodio*. Recuperado de <http://quiminsa.net/wp-content/uploads/2017/10/Hipoclorito-de-sodio-Ficha-de-Seguridad1.pdf>
- Ramírez Romero, P. & Mendoza Cantú, A. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo: La experiencia en México*. Recuperado de [http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/ensayo\\_toxicologico.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/ensayo_toxicologico.pdf)
- Recuero González, A. (2006). *Cálculo y diseño de una desaladora e integración en una central térmica de ciclo combinado* (Tesis de maestría). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona – Enginyeria Industrial, España.
- Recurso Nacional Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional. (s.f.-a). Respuestas OSH: Dióxido de carbono – Efectos en la salud. Recuperado de [http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem\\_profiles/carbon\\_dioxide/health\\_cd.html](http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html)
- (s.f.-b). Respuestas OSH: ¿Qué es un LD50 y LC50? Recuperado de <http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/ld50.html>
- Reyes Hernández, A. & Castillo Forero, M.A. (2017). Análisis de factibilidad para la implementación de fuentes alternas de generación de energía eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Tesis). Universidad Católica de Colombia – Facultad de Ingeniería, Bogotá. Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14538/1/2-ENERG%C3%8DA%20SAN%20ANDR%C3%89S%20ISLAS\\_v.3.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14538/1/2-ENERG%C3%8DA%20SAN%20ANDR%C3%89S%20ISLAS_v.3.pdf)

- RISCTOX. (s.f.). Base de datos de sustancias tóxicas y peligrosas RISCTOX. Recuperado de <https://risctox.istas.net/>
- Riva, A., D'Angelosante, S. & Trebeschi, C. (2006). Natural gas and the environmental results of life cycle assessment. *Energy*, 31(1), 138–148. doi: 10.1016/j.energy.2004.04.057
- Rocha Castro, E. (2010). *Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua. ISBN: 978-607-7691-56-3.
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., & Vieira, M. (2018). Life Cycle Impact Assessment. En Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3
- San Juan, D. (31 octubre 2016). Un gran clásico, torres de enfriamiento. *Cero Grados*. Recuperado de <https://0grados.com.mx/gran-clasico-torres-enfriamiento/>
- Sánchez Hernández, L. E., Porras Loaiza, G. L. & Gutiérrez Ramírez, R. (2009). *Externalidades de la generación de electricidad y el cambio climático*. Boletín IIE. Tendencias tecnológicas, octubre-diciembre-09. Recuperado de <https://www.ineel.mx/boletin042009/tenden.pdf>
- Santana-Rodríguez, C., Nápoles-García, M. & de la Cruz-Aragoneses, M. (2012). Evaluación de la planta de tratamiento de agua para los generadores de vapor en la central termoeléctrica 10 de octubre de Nuevitas. *Tecnología Química*, vol. XXXII, núm. (3), septiembre-diciembre 2012, 265–274. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852012000300006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852012000300006)
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499. doi: 10.1016/j.energy.2011.01.018
- Sarkar, Dipak K. (2017). General Description of Thermal Power Plants. En *Thermal Power Plant: Pre-Operational Activities*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/book/9780081011126/thermal-power-plant#book-description>
- Sax, N. I. (1974). *Industrial Pollution*. N.Y.: Van Nostrand Reinhold Company.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. DGN. (2000). NMX-AA-093-SCFI-2000 Análisis de Agua – Determinación de la Conductividad Electrolítica – Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-093-1984) (CDU: 631.879). Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- Secretaría de Economía (SE). Coordinación General de Minería. Dirección General de Desarrollo Minero. (2014). *Perfil de Mercado del Carbón*. Recuperado de [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/informacion\\_Sectorial/minero/pm\\_carbon\\_2014.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacion_Sectorial/minero/pm_carbon_2014.pdf)
- Secretaría de Energía (SENER). (2014). Procesamiento, abastecimiento y transporte de gas.

- (2015). *Prospectiva del sector eléctrico 2015–2029*. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva del Sector Electrico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf)
- (2018a) *PRODESEN Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2018–2032*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- (2018b). *Prospectiva del sector eléctrico 2018–2032*. Recuperado de [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PSE\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PSE_18_32_F.pdf)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1996a). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- (1996b). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- (2019). Contaminantes atmosféricos: Características y algunos efectos a la salud. Recuperado de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AIRE01\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Secretaría de Salud. (1994). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- (2010). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-022-SSA1-2010. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Recuperado de <http://dof.gob.mx/normasOficiales/4149/salud1/salud1.htm>
- Selby, K.A., Puckorius, P.R. & Helm K.R. (1996) The use of Reclaimed Water in Electric Power Stations and Other Industrial Facilities. En *Clean Water: Factors that Influence Its Availability, Quality and Its Use*. Springer, Dordrecht. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0299-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0299-2_19)
- Severns, W. H., Degler, H. E., Miles, J. C., & Gayán, J. B. (2007). *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases*. España: Ed. Reverté. ISBN: 9788429148909. Recuperado de <https://books.google.ca/books?id=gWAV5XxMgkIC>

- 
- Sincal Calderas Industriales. (2018). *Información Técnica ITSI-03. Calidad del agua de calderas. Versión 1.00*. Recuperado de <http://www.sincal.es/descargas/calidad-de-agua-de-calderas.pdf>
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE). (s.f.). *Informe quincenal de la SNMPE – Potencia instalada, efectiva y firme*. Recuperado de <http://www.exploradores.org.pe/pdf2.php?url=pdf/750/Informe-Quincenal-Elctrico-Potencia-instalada-efectiva-y-firme.pdf>
- Solkem S.R.L. (s.f.). Ficha de datos de seguridad – Terpenos de naranja. Buenos Aires: Solkem S.R.L. Recuperado de <http://solkem.com.ar/wp-content/uploads/TERPENOS-DE-NARANJA-FDS.pdf>
- Sosa, R.A. & Carballo, S. (2010). Caracterización agronómica del agua de riego del campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (Tesis). Universidad Autónoma de Baja California Sur – Área de Conocimiento de Ciencias Agropecuarias Departamento Académico de Agronomía, La Paz, Baja California Sur, México. Recuperado de <http://biblio.uabcs.mx/tesis/TE%202339.pdf>
- Spath, P. L. & Mann, M. K. (2000). *Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Recuperado de <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27715.pdf>
- Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). Gobierno de Chile. (2014). Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Recuperado de [http://www.normativaconstruccion.cl/documentos\\_sitio/89292\\_termoelectricas.pdf](http://www.normativaconstruccion.cl/documentos_sitio/89292_termoelectricas.pdf)
- Swapan, B. & Debnath, A. K. (2015). Chapter II – Main Equipment. En Swapan, B. & Debnath, A. K. (Eds.) *Power Plant Instrumentation and Control Handbook* (pp. 39–146). Academic Press. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128009406000022>
- Tan, R. B., Wijaya, D. & Khoo, H. H. (2010). LCI (Life cycle inventory) analysis of fuels and electricity generation in Singapore. *Energy*, 35(12), 4910–4916. doi: 10.1016/j.energy.2010.08.036
- Taylor, J.S. & Wieser, M. (2002). Membranas. En American Water Work Association (AWWA), *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Suministros de Agua Comunitaria* (pp. 707-780). 5th Ed. España: McGraw Hill.
- Thermoflex®. Version 28, Thermoflow Inc., USA <https://www.thermoflow.com/>
- thinkstep. (s.f.). GaBi ts – Software for Life Cycle Assessment. Recuperado de <https://www.thinkstep.com/software/gabi-software/gabi-professional>
- TU Delft. (s.f.). About Zero Brine. Recuperado de <https://zerobrine.eu/>
-

- United States Energy Information Administration (EIA). (2017). Country Analysis Brief: Mexico. Recuperado de [https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries\\_long/Mexico/mexico.pdf](https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Mexico/mexico.pdf)
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (1995). External Combustion Sources. En *AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html>
- (1999). Technical Bulletin: Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), Why and How They Are Controlled. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/fnoxdoc.pdf>
- (2009). *Steam Electric Power Generating Point Source Category: Final Detailed Study Report* (EPA 821-R-09-008). Recuperado de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/steam-electric\\_detailed\\_study\\_report\\_2009.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/steam-electric_detailed_study_report_2009.pdf)
- (2015). 40 CFR Part 423 Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Steam Electric Power Generating Point Source Category; Final Rule, Part II, 2015. Recuperado de <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-11-03/pdf/2015-25663.pdf>
- (2017). Descripción general de los gases de efecto invernadero. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT). (s.f.) *Manifiesto de impacto ambiental. Modalidad particular. Ciclo combinado Agua Prieta II*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/son/estudios/2003/26SO2003E0018.pdf>
- Universidad de Chile & Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Gobierno de Chile. (2005). Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego: Informe final. Recuperado de <https://research.csiro.au/gestionrapel/wp-content/uploads/sites/79/2016/11/Criterios-de-calidad-de-aguas-o-efluentes-tratados-para-uso-en-riego-2005.pdf>
- Universidad de Vigo, EnergyLab, & Revertia. (2013). ecoRaee: Informe de resultados del ACV del proceso. Recuperado de <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf>
- Universitat de Barcelona. (2020). Calidad del agua, contaminación y toxicidad: algunas ideas y conceptos básicos. Recuperado de [http://www.ub.edu/fem/docs/divulgacio/NPrat\\_calidad\\_agua.pdf](http://www.ub.edu/fem/docs/divulgacio/NPrat_calidad_agua.pdf)
- Van Hoof, B., Monroy, N. & Saer, A. (2008). *Producción más limpia. Paradigma de gestión ambiental*. Alfaomega Grupo Editor: Mexico City, Mexico. ISBN: 978-970-15-1367-5

Villalba Atondo, A. I., del Castillo Alarcón, J. M., Gómez Álvarez, A., Pérez Villalba, A. M., Nubes Ortiz, G., Villalba Urquidy, S. & Salcido Esquer, A. (2013). Contaminación del agua y suelo en el ecosistema Río Agua Prieta, Sonora, México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, Vol. XV(1), 3-11. Recuperado de <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/129>

Virtual Koshland Science Museum. (s.f.) Ósmosis inversa [imagen]. Recuperado de <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/ImageView/00000293.html>

Younos, T., & Tulou, K. E. (2005). Overview of Desalination Techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), 3–10. doi: 10.1111/j.1936-704x.2005.mp132001002.x

## Anexo A – Parámetros de medición de la calidad del agua en las centrales termoeléctricas

### Parámetros de medición en el ciclo agua-vapor (CAV)

Tabla A.1  
Parámetros de medición en el CAV en diferentes puntos de control.

Parámetros de control	Compuestos utilizados para el control de parámetros	Observaciones
<b>Condensación y agua de alimentación</b>		
Conductividad catiónica (c)		
* Conductividad (c)	No hay químico que controle las sales; se controlan a base de purgas.	La presencia de sales se infiere de forma indirecta a través de la medición de la conductividad.
* pH (iones de hidrógeno) (d)	Para el control del pH se utilizan los fosfatos.	Indica la alcalinidad o acidez del agua. Cuando hay presencia de cobre, el pH debe mantenerse entre 8.8 y 9.2; y cuando no está presente, el pH debe ser mayor a 9.2.
Fe (d) y Cu (d)		Ocasionan corrosión electroquímica. El Fe se mide en $\mu\text{gr/l}$ y el Cu, en $\text{gr/l}$ .
SiO <sub>2</sub> (c)		Al combinarse con las aguas de la caldera origina silicatos que se precipitan, produciendo incrustaciones duras. Cuando el vapor las arrastra, estas incrustaciones se adhieren al sobrecalentador y a los álabes de la turbina.
Aceite		Se une a los lodos, produciendo incrustaciones duras, y favorece la formación de espumas en el agua de la caldera, produciendo vapor sucio. Se mide en $\mu\text{gr/l}$ .
* O <sub>2</sub> disuelto (c)	Hidracina, que actúa como secuestrante del O <sub>2</sub> disuelto.	El O <sub>2</sub> corroe las superficies de acero en contacto con el agua. La velocidad de reacción depende de la temperatura del agua: $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Productos inocuos para la caldera. A 270°C se forma el amoniaco, lo que contribuye a la alcalinización del CAV y del condensado.
CO <sub>2</sub>		El CO <sub>2</sub> produce corrosión en el cobre y sus aleaciones en el condensador y calentadores de baja presión. El cobre que se mezcla en el agua de la caldera contribuye a su corrosión electroquímica.

## Anexo A – Parámetros de medición de la calidad del agua en las centrales termoeléctricas

<b>Agua del calderín (depósito de almacenamiento de agua)</b>		
* Conductividad (c)		La presencia de sales se infiere de forma indirecta a través de la medición de la conductividad.
* pH (c)	Fosfatos	Los fosfatos no son compuestos volátiles.
Fosfatos (PO <sub>4</sub> ) (d)		Deben mantener cierto nivel en el agua de la caldera para que los iones remanentes de Ca y Mg precipiten en forma de sales complejas que se depositan en los lodos no adherentes y puedan ser evacuados.
SiO <sub>2</sub> (c)		
<b>Fase vapor</b>		
Conductividad catiónica (c)		
* Conductividad (d)	No hay químico que controle las sales; se controlan a base de purgas.	El control de las sales es indirecto, a través de la medición de la conductividad.
* pH (d)	El control en fase vapor es con amoníaco y derivados (aminas).	Las aminas y el amoníaco son compuestos volátiles.
Fe (d) y Cu (d)		Ocasionan corrosión electroquímica. El Fe se mide en µgr/l y el Cu, en gr/l.
SiO <sub>2</sub> (c)	No hay químico; se controlan a base de purgas.	La presencia de SiO <sub>2</sub> se infiere de forma indirecta, a través de la medición de la conductividad.

\* parámetros de control riguroso; c = continuo; d = diario

Tabla elaborada con información de García et al. (2008) y Aguilar (1981).

## Parámetros de control de las aguas de enfriamiento

Tabla A.2  
Parámetros de control en las aguas de enfriamiento

Parámetros de control	Compuestos utilizados para el control de parámetros	Observaciones
Alcalinidad o capacidad amortiguadora (semanal)		Mide la capacidad neutralizadora ácida (acepta los H <sup>+</sup> ). Se debe mantener cierto nivel de alcalinidad para evitar incrustaciones o depósitos duros y corrosión. Este indicador se expresa en ppm de NaOH.
* biocida: cloro (semanal)	Biocidas: su principio activo es el cloro (hipoclorito sódico o dióxido de cloro) o el bromo (bromuro sódico activado con cloro).	El biocida utilizado se verterá disuelto en el agua de purga llegando al medio receptor del vertido. Altas concentraciones (1 mg/l) son eficaces para la eliminación de microorganismos, pero la normatividad es exigente.
Calcio (semanal)		El calcio se mide a través del parámetro de dureza <sup>1</sup> . Las unidades son mg/l CaCO <sub>3</sub> .

## Anexo A – Parámetros de medición de la calidad del agua en las centrales termoeléctricas

Parámetros de control	Compuestos utilizados para el control de parámetros	Observaciones
Cloruros (d)		Favorecen la formación de espumas y ensucian el vapor; ciertos cloruros (MgCl <sub>2</sub> ) se hidrolizan en el agua formando ácidos corrosivos
* Conductividad (c)		
* pH (c)	<p>Un pH bajo favorece la corrosión y un pH alto, la aparición de incrustaciones por la disminución de la solubilidad de sales cálcicas y magnésicas (carbonatos y sulfatos, de preferencia).</p> <p>Para control de incrustaciones y corrosión:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Controlar el pH con ácido sulfúrico</li> <li>2. Antiincrustantes como el ácido fosfórico, llamado fosfonato, o los “todo orgánico” (alquiepoxicarboxilatos o AECs)</li> <li>3. Anticorrosivos a base de fosfatos que varían su composición de acuerdo con el pH elegido.</li> </ol>	<p>Las sales se pueden depositar en todo el circuito. Este tipo de sales disminuye su solubilidad a mayor temperatura y también la disminuye con el pH.</p> <p>Las incrustaciones producen un descenso en los coeficientes de transmisión de calor y una reducción en el paso de los tubos, provocando corrosiones y roturas de éstos.</p>
Sulfatos (en caso de anomalías)		Las torres deben lavarse continuamente a profundidad (5 mg/l en purgas cerradas). Antes de verter el producto del lavado, hay que reducirlo con un agente reductor (el metabisulfito sódico) para adecuar la concentración a los máximos permisibles.
<b>Aguas de refrigeración de equipos auxiliares</b>		
Problema = corrosión	<p>Inhibidor de corrosión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Molibdato (400-600 ppm)</li> <li>• Nitrito (600-1,200 ppm)</li> <li>• O combinación de los anteriores</li> </ul>	
Problema = microorganismos	Biocida, si fuera necesario.	

\* parámetros de control riguroso; c = continuo; d = diario

Los tres parámetros de medición continua son pH, conductividad y biocida.

<sup>1</sup> La dureza mide el contenido de calcio y magnesio en mg/l o ppm y puede ser:

- Temporal, si proviene de bicarbonatos de calcio y/o magnesio que, al descomponerse a cierta temperatura, forman bióxido de carbono, agua y carbonatos; éstos últimos se depositan en forma de incrustaciones por calentamiento.
- Permanente o no de carbonatos, si proviene de cloruros, sulfatos y nitratos de calcio y magnesio que, al sobrepasar su grado de solubilidad, se precipitan por calentamiento formando un depósito duro.

Otros parámetros de interés son la materia en suspensión, porque precipita y se deposita en forma de lodos sobre la superficie de la caldera, y la materia orgánica, ya que se deposita en forma de lodo; cuando la materia orgánica se descompone en la caldera por el calor, forma CO<sub>2</sub> y ácidos orgánicos corrosivos.

Tabla elaborada con información de García et al. (2008), Aguilar (1981).

## Anexo B – Metodología para la evaluación del impacto del ciclo de vida

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es la etapa del ACV dirigida a entender y evaluar la magnitud e importancia de los posibles impactos ambientales de un sistema a lo largo de todo el ciclo de vida (IMNC, 2008a). Su objetivo es examinar un sistema de producto desde una perspectiva ambiental mediante el uso de categorías de impacto e indicadores de categoría en combinación con los resultados del análisis del inventario. Esta etapa del ACV es de suma importancia ya que transforma un flujo elemental (emisiones o uso de recursos de un sistema de producto) del inventario en sus posibles impactos ambientales (Rosenbaum et al., 2018).

De acuerdo con los estándares de las normas ISO 14040/14044, esta etapa consta de los siguientes pasos (Rosenbaum et al., 2018):

- Obligatorios:
  - Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
  - Clasificación
  - Caracterización
- Opcionales:
  - Normalización
  - Ponderación

A continuación, se describirá brevemente en qué consisten cada uno de estos pasos.

### Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización

Una categoría de impacto está definida en la norma (IMNC, 2008a) como «una clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida». Rosenbaum et al. (2018) señalan que la selección de categorías de impacto debe realizarse antes de recopilar la información del inventario para asegurar que este último esté orientado a la evaluación planteada en los objetivos del estudio.

Cada categoría de impacto requiere de una representación cuantitativa denominada indicador de categoría. Existen dos tipos de categorías de impacto: de punto medio (*midpoint*) y de punto final (*endpoint*).

Los modelos de caracterización establecen una serie de categorías de impacto con sus respectivos indicadores de categoría y factores de caracterización. En la práctica, la selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización se reduce a la selección de uno o varios de los métodos de EICV, disponibles en forma de software (Rosenbaum et al., 2018).

## Clasificación

En este paso se asignan los resultados del inventario a las categorías de impacto seleccionadas de acuerdo con sus efectos potenciales conocidos. Por ejemplo, una emisión al aire de CO<sub>2</sub> se asigna a la categoría de impacto cambio climático. Cabe mencionar que existen sustancias que pueden tener varios impactos que pueden ser simultáneos y/o en serie, tal es el caso del SO<sub>2</sub>. Esta sustancia causa acidificación y además es tóxica cuando es inhalada, por lo que se asigna a las categorías de acidificación y toxicidad humana. Por otro lado, la acidificación puede causar movilidad de metales pesados en los suelos que, a su vez, dañan a los ecosistemas (Rosenbaum et al., 2018).

## Caracterización

La caracterización consiste en cuantificar la contribución de los resultados del inventario a las diferentes categorías de impacto. Para realizar el cálculo, por cada categoría de impacto, se convierten los resultados del inventario a unidades comunes multiplicándolos por sus respectivos factores de caracterización. Posteriormente, los resultados convertidos se suman y se obtiene como resultado un indicador numérico (puntuación de impacto) para cada categoría de impacto (Aranda, Zabalza, Martínez, Valero & Scarpellini, 2006; Rosenbaum et al., 2018).

Un factor de caracterización expresa qué tanto contribuye una unidad de masa de una sustancia a una categoría de impacto; por ejemplo, qué tanto contribuye 1kg de una emisión química a la ecotoxicidad (Golsteijn, 2014). Se calcula utilizando modelos del mecanismo ambiental representado por una cadena de relaciones causa-efecto, que inician con la intervención ambiental (flujo elemental) y culminan con los impactos ambientales. La unidad del factor de caracterización es la misma para todos los flujos elementales dentro de una categoría de impacto y puede expresar los impactos directamente en términos absolutos (por ejemplo, el número de casos de una enfermedad/unidad de emisión tóxica) o indirectamente relacionándolos con el impacto de un flujo elemental de referencia (por ejemplo, CO<sub>2</sub>-equivalentes/unidad de emisión de gases de invernadero) (Rosenbaum et al., 2018).

A modo de ejemplo, tenemos que para la categoría de cambio climático se seleccionan sustancias que emiten gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O). Se toma como indicador de referencia los kg de CO<sub>2</sub> emitidos, por lo que se le asigna un factor de caracterización igual a la unidad. A partir de este indicador de referencia se determina el factor de caracterización de cada sustancia (Aranda et al., 2006). Con base en estudios científicos, se sabe que 1 kg de CH<sub>4</sub> tiene el mismo impacto que 24.5 kg de CO<sub>2</sub>, por lo que su factor de caracterización será de 24.5. La contribución del N<sub>2</sub>O al calentamiento global es 320 veces mayor que la del CO<sub>2</sub>; por tanto, su factor de caracterización será 320 (Castells, 2005).

El indicador numérico para la categoría cambio climático se obtendrá a partir de la siguiente fórmula (Aranda et al., 2006):

$$IC = \sum_i (FC_i \cdot m_i)$$

Donde:

- $IC$  es el indicador de la categoría
- $FC_i$  es el factor de caracterización de la categoría de la sustancia  $i$
- $m$  es la masa emitida de la sustancia  $i$

La Figura B.1 muestra los pasos mencionados anteriormente y se proporciona un ejemplo que muestra el procedimiento para obtener el valor del indicador de punto medio de la categoría, en este caso la categoría de impacto de acidificación.

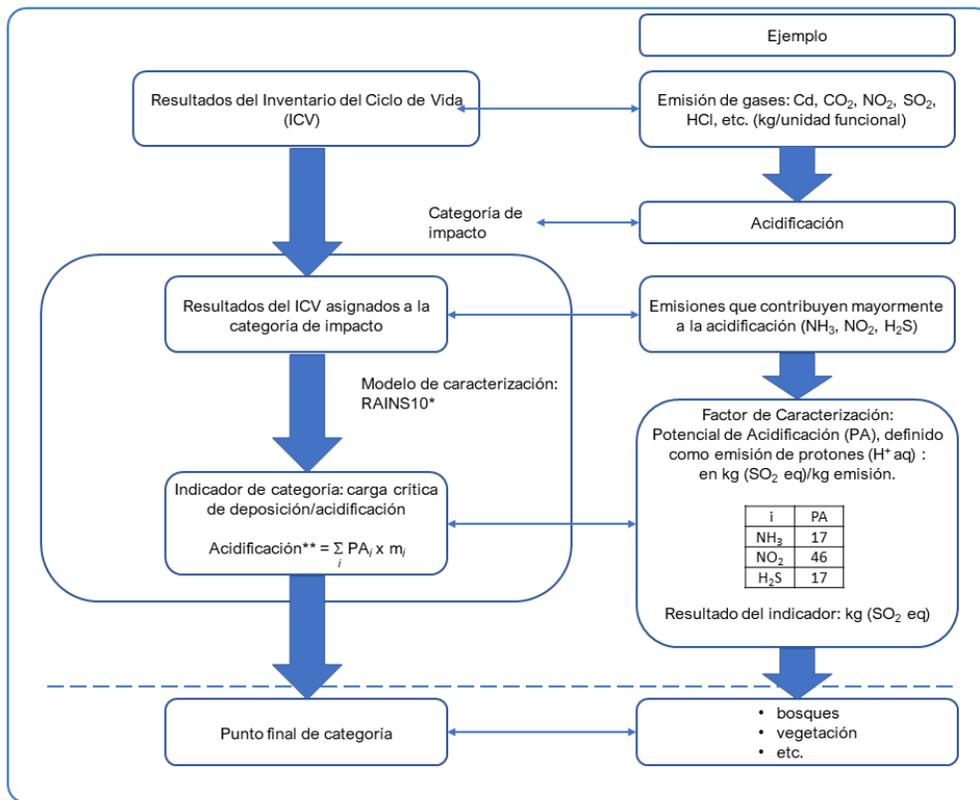


Figura B.1 Esquema de clasificación y caracterización para la categoría Acidificación.

\*Regional Air Pollution Information and Simulation (RAIN), describe la deposición de sustancias acidificantes, adaptada al ACV.

\*\* PA<sub>i</sub> es el potencial de acidificación de la sustancia  $i$  emitida al aire;  $m_i$  es la emisión de la sustancia  $i$  al aire.

Tomado y adaptado de Guinée (2002) e IMNC (2008b).

## Normalización

Los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización se presentan, por lo general, en unidades que no son fáciles de comprender, tales como los kg CO<sub>2</sub> equivalentes (Ponsioen, 2014). Aunado a lo anterior, Aymard y Botta-Genoulaz (2016) señalan la dificultad de clasificar categorías de impacto que no miden los mismos efectos —y, por ende, están expresados en diferentes unidades—, por ejemplo, ¿cómo se comparan el impacto del calentamiento global y el de acidificación entre sí? La normalización, uno de los pasos opcionales en la etapa de la EICV, permite hacer tales comparaciones independientemente de la unidad de medida.

El proceso de normalización muestra la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización con respecto a un sistema de referencia —por ejemplo, un país, el mundo o un sector industrial. Al relacionar los diferentes impactos potenciales con una escala en común, se pueden expresar en unidades comunes, lo cual dará una idea de cuáles impactos potenciales son grandes y cuáles son pequeños, con respecto al sistema de referencia (Aranda et al., 2006; Rosenbaum et al., 2018).

Para obtener los resultados normalizados, los resultados de la caracterización de cada categoría de impacto se dividen entre un valor de referencia, de acuerdo con la siguiente fórmula (Aymard & Botta-Genoulaz, 2016):

$$N_i = \frac{S_i}{R_i}$$

Donde

$i$	es la categoría de impacto
$N_i$	es el resultado normalizado
$S_i$	es el impacto caracterizado de la categoría de impacto $i$ del sistema bajo estudio
$R_i$	es el impacto caracterizado de la categoría de impacto $i$ del sistema de referencia

Rosenbaum et al. (2018) señalan que los sistemas de referencias típicos son impactos totales por categoría de impacto por

- Área geográfica, que puede ser global, continental, nacional, regional o local
- Habitante de un área geográfica
- Sector industrial de un área geográfica

El software para ACV incluye uno o más conjuntos de normalización que pueden ser utilizados por diferentes métodos de EICV. La Tabla B.1. muestra algunos de ellos.

Tabla B.1  
*Algunos conjuntos de normalización disponibles*

<b>Método</b>	<b>Conjuntos de normalización</b>
CML-IA	World 1990, 1995, 2000; EU28, 2000; EU25, 2000; West Europe, 1995; Netherlands, 1997
IICD Midpoint	EU-27
IMPACT 2002+	Europe, 2000
ReCiPe	Europe, 2000; World, 2000
BEES+	USA, 1997
TRAC	US-Canada, 2008; US, 2008; Canada, 2008
USEtox	Europe, 2004; North America, 2002/2008

Tabla elaborada con información de Ponsioen (2014).

## Ponderación

La ponderación se utiliza para determinar la relevancia de los impactos. Este proceso consiste en multiplicar los resultados normalizados de cada una de las categorías de impacto por un factor de ponderación que expresa la importancia relativa de la categoría de impacto. Los resultados ponderados tienen una misma unidad y pueden ser agregados para crear una única puntuación para el impacto ambiental de un producto o escenario. No existe una base científica u objetiva para este paso. Independientemente del método de ponderación que se aplique, éste siempre estará basado en las elecciones subjetivas de una persona o un grupo de individuos. De ahí que este último paso sea quizás el más debatido (Rosenbaum et al., 2018; Meijer, 2014).

Los enfoques que se utilizan para determinar los factores de ponderación se clasifican en 4 categorías (Meijer, 2014):

- **Distancia al objetivo de la política:** los factores de ponderación se determinan a partir de la distancia que hay entre la situación ambiental actual y las metas establecidas por políticas.
- **Distancia al objetivo científico:** los factores de ponderación se determinan a partir de la distancia que hay entre la situación ambiental actual y los objetivos científicos establecidos. Por lo general, los niveles máximos permitidos de una emisión para una categoría de impacto dada se utilizan como objetivos. El problema con este enfoque es que no todas las categorías de impacto tienen objetivos basados en datos científicos y los que están disponibles no siempre están actualizados.
- **Monetarios:** la importancia relativa de una categoría de impacto se expresa en valor monetario. Este valor puede estar basado en los costos asociados con la prevención o reparación del daño. Otra forma de monetizar una categoría de impacto es midiendo la disposición que tenga la gente a pagar para prevenir un cierto impacto.
- **Panel:** la forma de determinar los factores de ponderación es preguntando directamente a un grupo de personas su opinión sobre lo que es más importante.

## Anexo C – Balance de masa y energía

En esta sección se presentan el esquema de la planta de estudio, así como las tablas de resultados del balance de masa y energía. Estos resultados se muestran en inglés, tal como los arroja el programa.

### Esquema de la planta de ciclo combinado evaluada

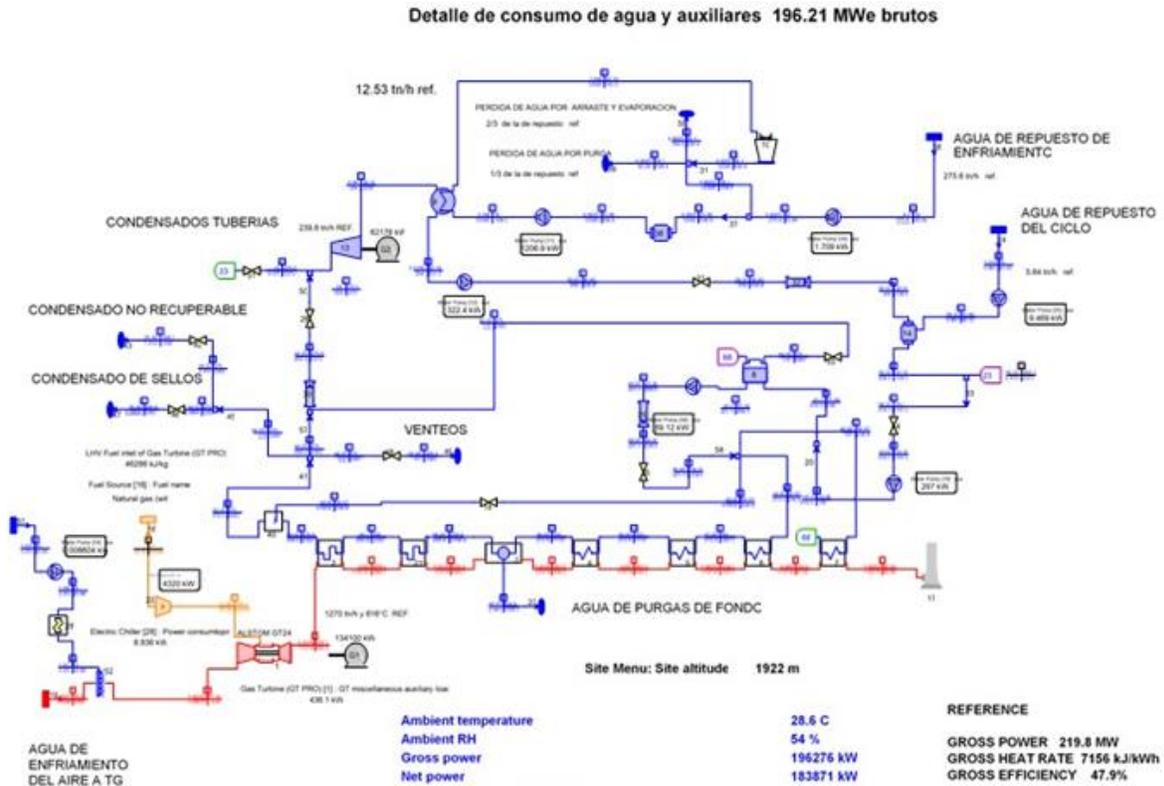


Figura C.1. Planta de ciclo combinado: detalle de consumo de agua y auxiliares.

Esquema generado con Thermoflex® versión 28 (v. 28.; Thermoflow Inc.).

## Balance de energía

Component	Energy unassociated with streams	Energy input	Energy output
		[kW]	[kW]
Wet Cooling Tower [10]	Heat removed/lost		118,419
Economiser [5]	Heat removed/lost		319.2
Economiser [7]	Heat removed/lost		35.63
Economiser [6]	Heat removed/lost		71.03
Electric Chiller [28]	Power Consumption	8.84	
Electric Chiller [28]	Heat removed/lost		35.35
Evaporator [3]	Heat removed/lost		743.1
Fuel Compressor [22]	Compression power	3,985	
Fuel Compressor [22]	Heat removed/lost		806.9
Fuel Source [16]	Heat input	364,641	
Gas Turbine (GT PRO) [1]	Power production		134,100
Gas Turbine (GT PRO) [1]	Heat removed/lost		17,549
Gas/Air Source [15]	Heat input	1,130.6	
Pipe [29]	Heat removed/lost		2,676.1
Pipe [30]	Heat removed/lost		567.8
Pipe [32]	Heat removed/lost		1,133.3
ST Group [13]	Expansion power		63,283
Concrete Stack [17]	Heat removed/lost		24,170
Superheater [2]	Heat removed/lost		0
Superheater [21]	Heat removed/lost		262.6
Water Pump [11]	Pumping power	1,129.2	
Water Pump [12]	Pumping power	299	
Water Pump [19]	Pumping power	275.2	
Water Pump [25]	Pumping power	8.29	
Water Pump [34]	Pumping power	1.41	
Water Pump [54]	Pumping power	0.01	
Water Pump [56]	Pumping power	63.02	
Water Sink [23]	Heat removed/lost		-1,405.8
Water Sink [43]	Heat removed/lost		328
Water Sink [47]	Heat removed/lost		20.05
Water Sink [49]	Heat removed/lost		185.6
Water Sink [39]	Heat removed/lost		-62,503
Water Sink [59]	Heat removed/lost		-125,005
Water Source [24]	Heat input	-4,049	
Water Source [38]	Heat input	-188,603	
Water Source [53]	Heat input	-2,228.9	
Water/Steam Splixer [36]	Heat input	-873	
<b>Total Energy Input</b>		<b>175,788</b>	
<b>Total Energy Output</b>			<b>175,792</b>
<b>Cycle Heat Imbalance</b>			<b>3.43*</b>

\* 0.002 % de error, despreciable.

## Balance de masa

Component	Mass flow unassociated with streams	Mass flow in	Mass flow out
		[t/h]	[t/h]
Fuel Source [16]	Mass flow in	28.36	
Gas/Air Source [15]	Mass flow in	1,106	
Concrete Stack [17]	Mass flow out		1,137.6
Water Sink [23]	Mass flow out		3.57
Water Sink [43]	Mass flow out		1.41
Water Sink [47]	Mass flow out		0.09
Water Sink [49]	Mass flow out		0.8
Water Sink [39]	Mass flow out		92.29
Water Sink [59]	Mass flow out		184.6
Water Source [24]	Mass flow in	5.87	
Water Source [38]	Mass flow in	275.6	
Water Source [53]	Mass flow in	3.26	
Water/Steam Splixer [36]	Mass flow in	1.27	
<b>Total Mass Flow In</b>		<b>1,420.3</b>	
<b>Total Mass Flow Out</b>			<b>1,420.3</b>
<b>Cycle Mass Imbalance</b>			<b>0</b>

## Resumen de la planta

	Unit	LHV	HHV
Net fuel input	[kW]	364,641	403,695
Gross heat rate	[kW]	6,688	
Net heat rate	[kJ/kWh]	7,139	7,904
Gross electric efficiency	[kJ/kWh]	53.83	
Net electric efficiency	[%]	50.43	45.55
CHP efficiency	[%]	50.43	
PURPA efficiency	[%]	50.43	
Gross power	[kW]	196,276	
Net power	[kW]	183,871	
Total auxiliaries	[kW]	12,404	
Net process heat output	[kW]	0	

SYSTEM SUMMARY

Steam Property Formulation - IFC-67

Ambient pressure = 0.8025 bar Temperature = 28.6 C RH = 54 %

THERMOFLEX® Version 28

POWER DEVICE(S)						
Generator	Component	Shaft	Shaft [kW]	Eff [%]	Gen [kW]	Accounted [kW]
	Gas Turbine (GT PRO) [1]		136,213.4			
Generator [1]		Shaft 1	136,213.4	98.45	134,099.7	134,099.7
	ST Group [13]		63,251.5			
Generator [2]		Shaft 2	63,251.5	98.3	62,175.9	62,175.9
<b>Total Generator(s)</b>					<b>196,275.6</b>	<b>196,275.6</b>

AUXILIARY DEVICE(S)	Aux [kW]	Accounted [kW]
Electric Chiller [28]: aux	8.8	8.8
Fogger [52]: aux	16.6	16.6
Fuel Compressor [22]: aux	4,320.4	4,320.4
Gas Turbine (GT PRO) [1]: aux	436.1	436.1
Water Pump [11]: aux	1,206.9	1,206.9
Water Pump [12]: aux	322.4	322.4
Water Pump [19]: aux	297	297
Water Pump [25]: aux	9.5	9.5
Water Pump [34]: aux	1.7	1.7
Water Pump [54]: aux	0	0
Water Pump [56]: aux	69.1	69.1
Water-cooled Condenser [9]: pump	0	0
Wet Cooling Tower [10]: fan/pump	416.1	416.1
<b>Total components auxiliaries</b>	<b>7,104.7</b>	<b>7,104.7</b>
<b>Total miscellaneous auxiliary</b>		<b>5,299.4</b>
<b>Total plant auxiliary</b>		<b>12,404.1</b>

<b>HEAT DEVICE(S)</b>	
<b>Component</b>	<b>[kW]</b>
Fuel Source [16]	364,640.9
Gas/Air Source [15]	0
Water Source [24]	102.7
Water Source [38]	6,424.6
Water Source [53]	76
Water Sink [23]	1,118.4
Water Sink [39]	2,804.9
Water Sink [43]	1,328.3
Water Sink [47]	81.2
Water Sink [49]	751.7
Water Sink [59]	5,609.7
Water/Steam Splixer [14]	0
Water/Steam Splixer [36]	0
<b>STREAMS</b>	
<b>Fluid Type</b>	<b>Number</b>
Gas/Air	10
Water/Steam	58
Fuel	2

## Anexo D – Características, toxicidad e impacto de los compuestos químicos

A continuación, se describe el significado de los símbolos y acrónimos utilizados en esta sección.

### Símbolos



Corrosivo



Dañino para el medio ambiente



Inflamable



Irritante



Peligroso para el cuerpo



Tóxico

### Glosario

---

CMP-CPT	Concentración máxima permisible para cortos períodos de tiempo Concentración máxima a la que los trabajadores pueden estar expuestos durante un período continuo y hasta 15 minutos, sin sufrir efectos adversos, siempre que no se produzcan más de cuatro de estas situaciones por día y estando separadas como mínimo en 60 minutos, no excediendo la concentración máxima permisible ponderada en el tiempo.
EC <sub>50</sub>	Concentración efectiva media (Effective Concentration 50) Concentración, calculada estadísticamente, de una sustancia en el medio, que se espera que produzca un determinado efecto en el 50% de los organismos de experimentación de una población dada, bajo un conjunto de condiciones definidas.
IDLH	Peligro inmediato a la salud o a la vida (Immediately Dangerous to Life or Health) Se define como un valor máximo en ppm o mg/m <sup>3</sup> en concentración de un contaminante tóxico al cual una persona puede escapar sin daños irreversibles a su salud en un período de hasta 30 minutos de exposición.
LC	Concentración letal (Lethal Concentration) Proporción de una sustancia tóxica en un medio, que causa la muerte después de un cierto período de exposición.
LC <sub>50</sub>	Concentración letal media (Lethal Concentration 50) Concentración, calculada estadísticamente, de una sustancia en el medio, que se espera que mate al 50% de los organismos de una población bajo un conjunto de condiciones definidas.
LD	Dosis letal (Lethal Dose)

## Anexo D – Características, toxicidad e impacto de los compuestos químicos

---

LD <sub>50</sub>	Dosis letal media Dosis, calculada estadísticamente, de un agente químico o físico (radiación) que se espera que mate al 50% de los organismos de una población bajo un conjunto de condiciones definidas.
LOEC	Concentración más baja con efecto observado (Lowest-Observed-Effect-Concentration) La menor concentración de un químico utilizado en un ensayo de toxicidad en la cual se observa un efecto significativo cuando se compara con el control.
LDLO	Dosis letal mínima (Lethal dose low) La menor cantidad de sustancia que introducida en el organismo produce la muerte a algún animal de experimentación bajo un conjunto de condiciones definidas.
MAK	Concentraciones máximas en áreas de trabajo que no producirán generalmente alteraciones de la salud de los trabajadores ni causarán molestias indebidas. Estos valores aplican en Alemania.
NIOSH	Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (National Institute for Occupational Safety and Health)
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Occupational Safety and Health Administration)
PEL	Valores límite de exposición permisibles (Permissible Exposure Limit)
REL-C	Límite de exposición recomendado (Recommended Exposure Limit) Para el NIOSH, las concentraciones techo (“C”) son valores de exposición máxima, con referencia explícita a períodos de 15 minutos o inferiores. Para la OSHA, estos niveles de concentración no deben ser superados en ningún momento de la jornada de trabajo y se determinan como valores promediados para períodos de 15 minutos si no se cuenta con una medida instantánea.
RQ	Coficiente de riesgo (Risk Quotient)
TDLO	Dosis tóxica mínima (Toxic Dose Low) La menor cantidad de sustancia que introduce en el organismo produce la muerte a algún animal de experimentación bajo un conjunto de condiciones definidas.
TLV	Valor límite umbral (Threshold Limit Value) Representan los límites máximos permisibles de exposición a contaminantes del medio ambiente laboral
TWA	Promedio ponderado en el tiempo (Time-Weighted Average) Representa los valores de exposición promediados durante un período. El NIOSH prescribe períodos de hasta 10 horas, si no se indica otra duración; para la OSHA, la duración del período es de 8 horas.
TLV-TWA	Concentración media ponderada en el tiempo Es el valor límite establecido para una jornada laboral de 8 horas y 40 horas semanales, a la cual la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente día tras día sin sufrir efectos adversos. En exposiciones cortas se puede superar tres veces el valor TLV-TWA durante no más de 30 minutos en la jornada y en ningún caso se debe superar cinco veces, suponiendo que no se supere el valor TLV-TWA de la jornada.
VLA-EC	Valor Límite Ambiental-Exposición de Corta Duración Es el valor de referencia para la Exposición de Corta Duración (EC), que es la concentración media del agente químico en la zona de respiración del trabajador, medida o calculada para cualquier período de 15 minutos a lo largo de la jornada laboral, excepto para aquellos agentes químicos para los que se especifique un período de referencia inferior en la lista de Valores Límite.
VLA-ED	Valor límite ambiental de exposición diaria (límite de exposición de larga duración) Se define como la concentración media del agente químico a la que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos 8 horas diarias y 40 horas semanales durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para su salud.

---

Glosario elaborado con definiciones de Albiano y Villaamil Lepori (2015), Recurso Nacional Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional (s.f.-b), Government of Canada, P.W. (s.f.), Asociación Española de Toxicología (1995), Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2019; s.f.), RISCTOX (s.f.).

Tabla D.1  
Características, toxicidad e impacto del sulfato de sodio.

<b>Compuesto Químico</b>	Sulfato de sodio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
<b>CAS</b>	7757-82-6
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólido blanco higroscópico en diversas formas.</li> <li>• Se descompone por calentamiento. Esto produce óxidos de azufre y óxidos de sodio.</li> <li>• Muy soluble en el agua.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertidos: producto de la descarga del I.I. y de la T.E.</li> <li>• La combinación de sosa (NaOH) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) forma este tipo de sales, que son descargadas al agua. Estas aguas residuales pueden utilizarse para riego.</li> </ul>
<b>Límites máximos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información no disponible.</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las aguas residuales contienen iones disueltos y exceso de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.</li> <li>• El riego continuo provoca la salinización de los suelos, reduciendo la disponibilidad del agua para las plantas.</li> <li>• Las sales incrementan el esfuerzo que hace la planta para extraer el agua (efecto osmótico).</li> <li>• Hay una reducción en la producción de cultivos, que es proporcional al aumento en la salinidad del suelo.</li> <li>• La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración molesta de partículas en el aire.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La ingestión podría afectar al tracto gastrointestinal.</li> <li>• Los síntomas son náuseas, vómitos, dolor abdominal y diarrea.</li> </ul>
<b>Estrategias para mitigar el impacto</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si se tiene un buen nivel de filtración y el suelo no es alcalino, el suelo puede lavarse para eliminar el exceso de sales.</li> <li>2. Se pueden adicionar químicos para recuperar suelos salinos-alcalinos, neutralizar el pH y sustituir el sodio por calcio. Estos químicos pueden ser sales con calcio o materiales acidificantes como sulfúrico o pirita.</li> <li>3. Combinando la estrategia anterior con un buen uso de agua de lluvia o de riego se puede acelerar el proceso de recuperación.</li> <li>4. La adición de materia orgánica al suelo mejora diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, como pueden ser el aporte de residuos vegetales, animales o composta que permite elevar la cantidad de CO<sub>2</sub> y disminuir el pH; o añadir residuos altos en lignina, como la paja, y añadir fertilizantes de nitrógeno, entre otros.</li> </ol>

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (International Labour Organization [ILO], 2005), García (2012a), Badia Villas (1992) y PubChem (s.f.-l).

Tabla D.2  
Características, toxicidad e impacto de la sosa cáustica.

<b>Compuesto Químico</b>	Sosa cáustica (NaOH) – hidróxido de sodio, hidrato de sodio, lejía de sosa
<b>CAS</b>	1310-73-2
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólido blanco higroscópico en diversas formas.</li> <li>• Reacciona violentamente con ácidos.</li> <li>• Es corrosiva para muchos metales tales como aluminio, estaño, plomo y zinc.</li> <li>• En contacto con humedad y agua genera calor.</li> <li>• Reacciona con sales de amonio, produciendo amoniaco.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre otros usos, se utiliza en síntesis en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regeneración de resinas</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta sustancia es peligrosa para el medio ambiente; hay que prestar especial atención a los organismos acuáticos.</li> <li>• Puede alcanzarse rápidamente una concentración nociva de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.</li> <li>• Una concentración de 20-100 mg/l en el agua mata algunas especies de la fauna acuática debido a un aumento en el pH.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nocivo en caso de ingestión.</li> <li>• Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares.</li> <li>• Puede irritar las vías respiratorias.</li> </ul>
<b>Límites máximos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TLV: 2 mg/m<sup>3</sup> (valor techo)</li> <li>• VLA-EC: 2 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• RQ: 1000</li> <li>• IDLH: 250 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• México: CPT = 2 mg/m<sup>3</sup></li> </ul>

**Datos sobre toxicidad aguda en animales**

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada	Efectos
Roedor: ratón	LD <sub>50</sub>	Intraperitoneal	40 mg/kg	
Roedor: conejo	LD <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dérmica</li> <li>• Ocular</li> </ul>	500 ml/kg de una solución al 10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación severa en la piel: 500 mg/24 h</li> <li>• Irritación ocular leve: 4 mg</li> <li>• Irritación ocular severa: 1% o 50µg/24 h.</li> </ul>

Datos sobre ecotoxicidad				
Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Cyprinus carpio</i> (Carpa común europea)	LC <sub>100</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No especificadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>180 ppm por 24 h a 25°C</li> </ul>	
<i>Poecilia reticulata</i> (Gupi africano): edad = organismos jóvenes de 3-4 semanas de edad	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Agua salada</li> <li>Sistema cerrado con renovación</li> <li>24°C</li> <li>9.8 &lt; pH &lt; 10.0</li> <li>Salinidad del 2.8%</li> <li>Saturación de oxígeno disuelto ≥ 70%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>209,000 µg/l por 24 h</li> <li>Intervalo de confianza del 95%: 153,000-286,000 µg/l</li> <li>98.6% de pureza</li> </ul>	

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (ILO, 2010) y Facultad de Química-UNAM (s.f.). Los datos de ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-j) y la Facultad de Química-UNAM (s.f.).

Tabla D.3  
Características, toxicidad e impacto del ácido sulfúrico.

<b>Compuesto Químico</b>	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) – aceite de vitriolo
<b>CAS</b>	7664-93-9
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Líquido higroscópico incoloro, aceitoso e inodoro.</li> <li>Miscible en agua a 20°C.</li> <li>Se descompone por calentamiento, generando gases tóxicos y corrosivos incluyendo óxidos de azufre.</li> <li>Reacciona violentamente con bases y es corrosivo para la mayoría de los metales más comunes, originando hidrógeno (gas inflamable y explosivo).</li> <li>Reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos, desprendiendo calor.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entre sus múltiples usos, se emplea para hacer fertilizantes y otros químicos en el refinado de petróleo, y en la producción de hierro y acero.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>I.I. &amp; T.E.</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.</li> <li>La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire por pulverización.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La sustancia es muy corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio.</li> <li>La inhalación del aerosol de altas concentraciones puede causar edema pulmonar.</li> <li>La exposición repetida o prolongada al aerosol de esta sustancia puede ocasionar erosión dental.</li> <li>Las nieblas de esta sustancia son carcinógenas para los seres humanos.</li> </ul>

<b>Límites máximos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TLV: 0.2 mg/m<sup>3</sup>, como TWA</li> <li>• MAK (fracción inhalable): 0.1 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• VLA-ED (niebla): 0.05 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• PEL-TWA (8 h.): 1 mg/m<sup>3</sup> [OSHA]</li> <li>• TWA : 1 mg/m<sup>3</sup> [NIOSH]</li> </ul>
------------------------	--

**Datos sobre toxicidad aguda en animales**

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	• 2,140 mg/kg
Roedor: conejillo de Indias (animal joven)	LC <sub>50</sub>	Inhalatoria	• 0.018 mg/l/8 h • Tamaño de partícula = 1 µm

**Datos sobre ecotoxicidad**

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Brachydanio rerio</i> (Pez cebra)	LC <sub>50</sub>	• Sistema estático	• > 500 mg/l por 96 h	
<i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua común)	EC <sub>50</sub>	• Agua dulce • Sistema estático • pH = 2.8-6.5	• 0.0025 M por 10 días • 100% de pureza	• Disminución en el crecimiento, número de frondas y número de hojas
<i>Pandalus montagui</i> (Camarón Esópico): edad = adulto	LC <sub>50</sub>	• Agua salada • Sistema cerrado con renovación • 15°C	• 42,500 µg/l por 48 h	

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (ILO, 2016). Los datos de ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-m).

Tabla D.4  
Características, toxicidad e impacto del biocida oxidante.

<b>Compuesto Químico</b>	Biocida oxidante: hipoclorito de sodio (NaOCl) al 12%
<b>CAS</b>	• 7681-52-9
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disolución clara, ligeramente amarilla, de olor característico.</li> <li>• El hipoclorito es la sal del ácido hipocloroso. Se aplica generalmente como hipoclorito de sodio (NaClO).</li> <li>• Esta sal, proveniente de un ácido débil, también produce soluciones alcalinas.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su uso es preferido cuando se desea no agregar dureza al agua y por su facilidad de manejo.</li> <li>• La acción biocida de los agentes oxidantes interfiere con la síntesis de la proteína en las células, resultando en la muerte de los microorganismos.</li> </ul>

<b>Proceso en donde se utiliza</b>	• T.E.		
<b>Riesgo para el ambiente</b>	• Muy tóxico para los organismos acuáticos.		
<b>Riesgo para la salud</b>	• Quemaduras en la piel, ojos, tracto respiratorio y membranas mucosas.		
Datos sobre toxicidad aguda			
	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
<b>Humanos</b>			
Hombre	TDLo	Intravenosa	45 mg/kg
Mujer	TDLo	Oral	1 g/kg
<b>Animales</b>			
Rata	LD <sub>50</sub>	Intraperitoneal	65.12 µg/kg (TDLo)
Ratón	LD <sub>50</sub>	Oral	5,800 mg/kg

Datos sobre ecotoxicidad			
Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua): edad < 24 h	EC <sub>50</sub>	• Duración del estudio = 48 h	• 2.3 ppm
<i>Skeletonema costatum</i> (Diatomea marina): sin registro de edad	LOEC	• Duración del estudio = 72 h	• > 30 ppm
<i>Lepomis macrochirus</i> (Mojarra oreja azul): edad = 6 g	LC <sub>50</sub>	• Duración del estudio = 24 h	• 2.1 ppm

Tabla elaborada con información de Lenntech (s.f.-c). Los datos sobre ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de Quiminsa – Químicos Industriales S.A. (s.f.) y PubChem (s.f.-k).

Tabla D.5  
Características, toxicidad e impacto del inhibidor para la corrosión e incrustaciones de cobre.

<b>Compuesto Químico</b>	Inhibidor para la corrosión e incrustaciones de cobre: tolitriazol (TTA) (C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> N <sub>3</sub> )
<b>CAS</b>	29385-43-1
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gránulo o polvo de color blanco.</li> <li>• Es una mezcla de 4-metil-benzotriazol y 5-metil-benzotriazol.</li> <li>• Es soluble en alcohol, benceno, tolueno, cloroformo y lejía acuosa, pero difícilmente soluble en agua.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	• Antioxidante e inhibidor de corrosión para metales (cobre, plata, zinc, plomo, níquel, bronce, etc.) y metales ferrosos.

<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• T.E.</li> </ul>
<b>Riesgo para el ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peligroso para el medio acuático.</li> <li>• Peligroso para los organismos acuáticos, con efectos duraderos.</li> </ul>
<b>Riesgo para la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dañino si se ingiere o se inhala.</li> <li>• Puede producir irritación ocular severa</li> </ul>
<b>Datos sobre ecotoxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se encontraron datos disponibles.</li> </ul>

**Datos sobre toxicidad aguda en animales**

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: conejo	LD	Dérmica	> 4 g/kg
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	= 675 mg/kg
Roedor: rata	LC	Inhalatoria	> 1,730 mg/m <sup>3</sup> /1 h

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (IRO Group Inc., s.f.), GuideChem (s.f.) y PubChem (s.f.-c). Los datos sobre toxicidad fueron tomados de ChemSrc (s.f.).

Tabla D.6

*Características, toxicidad e impacto del inhibidor para la corrosión e incrustaciones de acero.*

<b>Compuesto Químico</b>	Inhibidor para la corrosión e incrustaciones de acero: ácido hidroxifosfonoacético (HPAA) (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>6</sub> P)
<b>CAS</b>	23783-26-8
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido café oscuro.</li> <li>• HPAA es químicamente estable, difícil de hidrolizar, difícil de degradar por ácido o álcali.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es principalmente utilizado como inhibidor de incrustación en sistemas de agua de enfriamiento.</li> <li>• Presenta propiedades excelentes como inhibidor de corrosión; cuando se formula con una sal de zinc, el efecto es mucho más efectivo.</li> <li>• Tiene una excelente estabilidad térmica y bajo contenido de fósforo, resultando en un impacto ambiental bajo.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	T.E.
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay información disponible.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta sustancia provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.</li> <li>• Nocivo por ingestión.</li> <li>• La exposición repetida o prolongada puede causar daño a los órganos.</li> </ul>
<b>Datos sobre ecotoxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay información disponible.</li> </ul>

**Datos sobre toxicidad** • No hay información disponible

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (Maquimex, 2014) y PubChem (s.f.-i). La información sobre los riesgos a la salud se obtuvo de European Chemicals Agency (ECHA) (s.f.).

Tabla D.7  
Características, toxicidad e impacto del biodispersante.

<b>Compuesto Químico</b>	Biodispersante: terpenos de naranja (D-Limoneno de naranja (C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> ))
<b>CAS</b>	• 5989-27-5
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido de aspecto incoloro a ligeramente amarillento; olor suave a naranja.</li> <li>• Como líquido inflamable, puede liberar vapores que forman mezclas explosivas a temperaturas por debajo del punto de inflamación.</li> <li>• Productos de descomposición peligrosos: óxidos de carbono y óxidos de terpenos cítricos</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	• Compuestos químicos que ayudan a eliminar los polímeros extracelulares que producen las bacterias para mantenerse unidas.
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	• T.E.
<b>Límites de exposición</b>	• TLV no establecido.
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.</li> <li>• Es posible la acumulación en organismos.</li> <li>• Fácilmente biodegradable.</li> <li>• El producto es insoluble y flota en el agua; además se evapora lentamente.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su ingestión e inhalación puede ser mortal.</li> <li>• Su ingestión produce dolor de cabeza, náuseas, convulsiones y pérdida de la conciencia.</li> <li>• Su inhalación produce náuseas, somnolencia, mareos y pérdida de la conciencia.</li> <li>• El contacto repetido o prolongado puede causar resequedad o irritación de la piel y de las mucosas.</li> </ul>

**Datos sobre ecotoxicidad**

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Eisenia fetida</i> (Savigny) (Lombriz roja)	LC <sub>50</sub>		• 6.0 ppm por 48 h	
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua)	LC <sub>50</sub>	• Circuito abierto	• 0.577 mg/l por 48 h	
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua): edad = 24 h; neonata	EC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema estático</li> <li>• 20°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,850 µg/l por 48 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 6,860-8,960 µg/l)</li> <li>• 97% de pureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intoxicación</li> <li>• Inmovilización</li> </ul>

## Anexo D – Características, toxicidad e impacto de los compuestos químicos

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Pimephales promelas</i> (Carpita cabezona): edad = 32-34 días; talla = 21.8 mm; peso = 0.177g	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Circuito abierto</li> <li>• 24.4°C</li> <li>• pH = 7.6</li> <li>• Dureza = 46.3 mg/l CaCO<sub>3</sub></li> <li>• Alcalinidad = 39.5 mg/l CaCO<sub>3</sub></li> <li>• Oxígeno disuelto = 5.9 mg/l</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 702 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 619-796 µg/l</li> <li>• 97% de pureza</li> </ul>	

### Datos sobre toxicidad en animales

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: ratón	LD <sub>50</sub>	Oral	5.6-6.6 g/kg
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	5 g/kg de peso corporal
Roedor: conejo	LD <sub>50</sub>	Dérmica	> 5 g/kg de peso corporal (24 h de aplicación)

Tabla elaborada con información de la ficha de datos de seguridad del producto (Solkem S.R.L., s.f.). Los datos de toxicidad y ecotoxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-e).

Tabla D.8

*Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo I.*

<b>Compuesto Químico</b>	Microbicida industrial no oxidativo I: microbicida de amplio espectro no oxidativo a base de isotiazolinonas (mezcla de MIT y CMIT)
<b>CAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MIT: 2682-20-4</li> <li>• CMIT: 26172-55-4</li> </ul>
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La isotiazolinona (isotiazolina) es un microbicida de amplio espectro y rápida inhibición al crecimiento de microorganismos.</li> <li>• Sus compuestos derivados son la metil isotiazolinona (MIT) y la clorometil isotiazolinona (CMIT).</li> <li>• Las isotiazolinonas se encuentran bajo el nombre comercial de Kathon.</li> <li>• La mezcla de CMIT/MIT es un líquido de aspecto claro a ligeramente turbio, de color verde pálido a amarillo pálido, de olor suave.</li> <li>• Esta mezcla es biodegradable, no produce espuma y es compatible con inhibidores de corrosión, de cloro y de incrustaciones, así como con formulaciones aniónicas, catiónicas y no iónicas.</li> <li>• Es totalmente soluble en agua.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	

## Anexo D – Características, toxicidad e impacto de los compuestos químicos

<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microbicida de alto desempeño, amplio espectro y agente microbiano, basado en la química de las isotiazolinonas.</li> <li>• Inhibe el crecimiento de microorganismos; controla algas, bacterias y hongos que se encuentran en sistemas industriales de agua.</li> <li>• Es efectiva contra la formación de biopelícula.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• T.E.</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy tóxico para los peces y otros organismos acuáticos.</li> <li>• Esta mezcla puede desprender CO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es corrosiva.</li> <li>• Ocasiona quemaduras severas en ojos y piel.</li> <li>• La inhalación de vapor o neblina puede causar irritación de la nariz, garganta y pulmones.</li> <li>• Puede ser nocivo si se ingiere.</li> </ul>

### Datos sobre toxicidad aguda en animales

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: conejo	LD <sub>50</sub>	Dérmica	200 mg/kg /Kathon 886
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	105 mg/kg /Kathon 886
Roedor: rata (hembra)	LD <sub>50</sub>	Oral	183 mg/kg de peso corporal /RH-573 grado técnico

### Datos sobre ecotoxicidad

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Colinus virginianus</i> (Codorniz Cotuí): edad = 11 días	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Químico incorporado en el alimento durante 8 días</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,200 ppm</li> </ul>	
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua): edad < 24 h.	EC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Circuito abierto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 180 µg/l por 48 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 140-190 µg/l</li> <li>• 14.17% de pureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intoxicación</li> <li>• Inmovilización</li> </ul>
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoíris): peso = 0.52 g	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Circuito abierto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 190 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 130-310 µg/l</li> <li>• 14.17% de pureza</li> </ul>	

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad de la mezcla de CMIT/MIT (Maquimex, 2015a) y de Maquimex (s.f.). Los datos sobre ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-b).

Tabla D.9

Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo I.

<b>Compuesto Químico</b>	Microbicida industrial no oxidativo I: 2,2-dibromo-nitrilopropionamida (DBNPA) (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O)
<b>CAS</b>	• 10222-01-2

<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido de aspecto incoloro a marrón con un ligero olor.</li> <li>• Baja solubilidad en agua.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biocida de amplio espectro y muy rápida acción, con particular eficacia sobre las bacterias, algas, hongos, levaduras y cianobacterias.</li> <li>• Se considera oxidante, pero se puede utilizar en sistemas con altos contenidos en biomasa.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• T.E.</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy tóxico para los peces y otros organismos acuáticos.</li> <li>• Se pueden liberar humos tóxicos en caso de incendio.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosivo.</li> <li>• Provoca grandes quemaduras en los ojos, irrita la piel y su ingestión es dañina.</li> </ul>

**Datos sobre ecotoxicidad**

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua): edad < 24 h.	EC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema estático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 860 µg/l por 48 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 560-1,000 µg/l</li> <li>• 100% de pureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intoxicación</li> <li>• Inmovilización</li> </ul>
<i>Americamysis bahia</i> (Camaroncito marsupial): edad < 24 h	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua salada</li> <li>• Circuito abierto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 720 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 520-1,300 µg/l</li> <li>• 99.5% de pureza</li> </ul>	
<i>Cyprinodon variegatus</i> (Bolín): peso = 0.27 g	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua salada</li> <li>• Sistema estático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3,400 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 3,000-4,900 µg/l</li> <li>• 95% de pureza</li> </ul>	
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoíris): juvenil	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema estático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,000 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 600-1,500 µg/l</li> <li>• 100% de pureza</li> </ul>	

**Datos sobre toxicidad aguda en animales**

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: ratón	LD <sub>50</sub>	Intravenosa	10 mg/kg
Roedor: conejo (macho)	LD <sub>50</sub>	Dérmica	> 2 g/kg
Roedor: conejo	LD <sub>50</sub>	Oral	118 mg/kg

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (Maquimex, 2015b). Los datos sobre ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-a).

Tabla D.10

Características, toxicidad e impacto del microbicida industrial no oxidativo II.

<b>Compuesto Químico</b>	Microbicida industrial no oxidativo II: sulfato de tetrakis-hidroximetil-fosfonio (THPS) (C <sub>8</sub> H <sub>24</sub> O <sub>12</sub> P <sub>2</sub> S)
<b>CAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 55566-30-8</li> </ul>
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido transparente, de incoloro a amarillos pálido, de olor característico.</li> <li>• Es efectivo en ambientes ácidos y alcalinos.</li> <li>• Miscible en todas proporciones, incluyendo agua de mar.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollado para inhibir el crecimiento de algas, bacterias, levaduras y hongos en aguas de proceso de diferentes industrias.</li> <li>• Es efectivo contra bacterias reductoras de sulfatos que aparecen en operaciones de recuperación de aceite, tales como operaciones de reinyección de agua y perforación de pozos.</li> <li>• Además de eliminar microorganismos, disuelve el sulfuro de hierro.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	T.E.
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy tóxico para la vida acuática, con efectos duraderos</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es irritante: hay riesgo de daño ocular severo y sensibilización de la piel.</li> <li>• Tóxico si se inhala.</li> <li>• Dañino si se ingiere, pudiendo ser fatal.</li> </ul>

**Datos sobre ecotoxicidad**

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua): edad < 24 h	EC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema cerrado con renovación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15,000 µg/l por 48 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 12,000-18,000 µg/l</li> <li>• Formulación con un porcentaje de pureza del 75%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inmovilización</li> </ul>
<i>Lepomis macrochirus</i> (Mojarra oreja azul)	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema cerrado con renovación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 97,000 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 67,000-208,000 µg/l</li> <li>• Formulación con un porcentaje de pureza del 75%</li> </ul>	
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoíris)	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema cerrado con renovación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 94,000 µg/l por 96 h</li> <li>• Intervalo de confianza del 95%: 77,000-139,000 µg/l</li> <li>• Formulación con un porcentaje de pureza del 75%</li> </ul>	

Datos sobre toxicidad aguda en animales			
Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	248 mg/kg
Roedor: rata (macho)	LD <sub>50</sub>	Oral	333 mg/kg de peso corporal
Roedor: rata	LC <sub>50</sub>	Inhalatoria	5.5 mg/l durante 4 h

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (Maquimex, 2012). Los datos de ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-n).

Tabla D.11  
Características, toxicidad e impacto del fosfato trisódico.

<b>Compuesto Químico</b>	Fosfato trisódico (Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ); también conocido como fosfato tribásico de sodio
<b>CAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7601-54-9</li> </ul>
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cristales higroscópicos de aspecto incoloro a blanco.</li> <li>• Alta solubilidad en agua.</li> <li>• Se descompone por calentamiento. Esto produce humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de fósforo.</li> <li>• Reacciona violentamente con ácidos y es corrosiva.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Purificación del agua de alimentación de calderas.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo agua-vapor</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valores superiores a 0.015 mg/l generan un crecimiento excesivo de algas.</li> <li>• Problemas de eutrofización por uso generalizado.</li> <li>• Puede alcanzarse rápidamente una concentración molesta de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es dañino si es ingerido o inhalado.</li> <li>• Su ingestión causa irritación en el tracto gastrointestinal. Los síntomas incluyen náusea, vómito y diarrea, y puede causar quemaduras leves en la boca, garganta y estómago.</li> <li>• Causa irritaciones en la piel, ojos y tracto respiratorio.</li> <li>• En contacto con la piel, las soluciones acuosas —altamente alcalinas— pueden producir quemaduras cáusticas. La magnitud del daño dependerá del grado de exposición a la sustancia.</li> <li>• La exposición prolongada puede resultar en la destrucción de las membranas mucosas, bronquitis asmática, neumonitis química o edema pulmonar.</li> </ul>

Datos sobre ecotoxicidad			
Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración
<i>Gambusia affinis</i> (Pez mosquito; Guayacón mosquito): hembra adulta	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema estático</li> <li>• 17-22°C</li> <li>• pH = 7.4-10.3</li> <li>• Alcalinidad &lt; 100 mg/l CaCO<sub>3</sub></li> <li>• Turbiedad = 70-150 mg/l</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88,300 µg/l por 24 h</li> </ul>

Datos sobre toxicidad aguda en animales			
Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: conejo	LD <sub>50</sub>	Dérmica	≥ 2 mg/kg de peso corporal
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Inhalatoria	≥ 2.16 mg/l/1h

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (ILO, 2015). Los datos de toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-o).

Tabla D.12  
Características, toxicidad e impacto del fosfato disódico anhidro.

<b>Compuesto Químico</b>	Fosfato disódico anhidro (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> anhidro) – fosfato de sodio dibásico
<b>CAS</b>	• 7558-79-4
<b>Descripción</b>	• Polvo inodoro de color blanco, soluble en agua
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inhibe la formación de escamas de calcio en las plantas de tratamiento de agua.</li> <li>• Se usa de forma conjunta con el fosfato trisódico.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	• Ciclo agua-vapor
<b>Efectos</b>	• Puede formar óxidos de sodio y fósforo cuando se calienta para producir su descomposición.
<b>Riesgo al ambiente</b>	• No se encontró información disponible
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dañino si es ingerido o inhalado. La dosis letal estimada es 50 g.</li> <li>• Los fosfatos son absorbidos lenta e incompletamente cuando son ingeridos. Los síntomas incluyen vómito, letargo, diarrea, alteraciones cardiacas y efectos en el sistema nervioso.</li> <li>• La toxicidad de los fosfatos se debe a su habilidad para secuestrar el calcio y causar depósitos de fosfatos de calcio en los riñones.</li> <li>• La ingestión o inhalación crónica puede provocar envenenamiento por fósforo sistémico, que puede resultar en daño al hígado, anomalías mandibulares y dentales, desórdenes en la sangre y efectos cardiovasculares.</li> <li>• Causa irritación en la piel, ojos y tracto respiratorio.</li> </ul>

Datos sobre ecotoxicidad			
Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración
<i>Daphnia magna</i> (Pulga de agua)	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua dulce</li> <li>• Sistema estático</li> <li>• 21-25°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,154 mg/l por 25 h</li> </ul>
Datos sobre toxicidad aguda en animales			
Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	17 g/kg
Roedor: conejo	LDLO	Intravenosa	1,075 mg/kg

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (Industrias EMU S.A., s.f.). Los datos de ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-g).

Tabla D.13  
Características, toxicidad e impacto de la ciclohexilamina.

<b>Compuesto Químico</b>	Ciclohexilamina o aminohexahidrobenceno o hexahidroanilina
<b>CAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 108-91-8</li> </ul>
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto orgánico corrosivo alcalino. Pertenece a la clase de amina alifática.</li> <li>• Líquido de aspecto incoloro a amarillo, con olor acre, miscible en agua y disolvente orgánico común.</li> <li>• Con agua puede formar un azeótropo, con el punto de ebullición total de 96.40°C.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza para recubrimiento de tuberías y regulación de pH.</li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo agua-vapor</li> </ul>
<b>Límites máximos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TLV: 10 ppm como TWA.</li> <li>• VLA-ED: 10 ppm; 41 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• MAK: 8.2 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• REL: TWA 10 h: 10 ppm (40 mg/m<sup>3</sup>) [NIOSH]</li> </ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.</li> <li>• Se evapora a 20°C, por lo que se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva en el aire.</li> <li>• Se descompone al arder. Esto produce humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de nitrógeno.</li> <li>• Se reportó que una muestra de 200 mg/l de ciclohexilamina no pudo ser degradada por un lodo activado y se supuso que sería tóxica para la microflora.</li> </ul>

<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.</li> <li>• Es muy tóxica si se ingiere o se inhala.</li> <li>• Es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio.</li> <li>• Puede afectar al sistema nervioso central.</li> </ul>
<b>Datos sobre ecotoxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se encontraron datos</li> </ul>
<b>Datos de toxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probable dosis letal (vía oral) es 50-500 mg/kg o entre 1 cucharadita y 1 onza para una persona de 70 kg (150 lb)</li> </ul>

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (ILO, 2003). Los datos sobre seguridad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-d).

Tabla D.14  
Características, toxicidad e impacto de la hidracina.

<b>Compuesto Químico</b>	Hidracina (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) al 35% (CHEMIPOL BO)
<b>CAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 302-01-2</li> </ul>
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido incoloro, oleoso, con un olor similar al del amoníaco, que libera vapores cuando está expuesto al aire.</li> <li>• La hidracina es altamente tóxica y peligrosamente inestable, especialmente en la forma anhidra.</li> <li>• Comercialmente se suministra en disolución acuosa o como hidrato de hidracina (H<sub>2</sub>N-NH<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O)</li> <li>• Por encima de 40°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.</li> <li>• Riesgo de incendio y explosión en contacto con muchos materiales.</li> </ul>
<b>Seguridad química</b>	
<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reacciona con el oxígeno (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + O<sub>2</sub> → N<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O), reduciendo la posibilidad de corrosión por oxidación en los metales.</li> <li>• Además, al entrar en contacto con el óxido férrico, genera magnetita, agua y nitrógeno: N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + 6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → 4Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O + N<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo agua-vapor</li> </ul>
<b>Límites máximos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TLV: 0.01 ppm como TWA</li> <li>• VLA-ED: 0.01 ppm; 0.013 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• REL-C: Ca C 0.03 ppm (0.04 mg/m<sup>3</sup>) [2 horas]</li> </ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.</li> <li>• Es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio.</li> <li>• El contacto prolongado o repetido puede producir sensibilización de la piel.</li> <li>• Puede afectar al hígado, a los riñones y al sistema nervioso central.</li> <li>• Es posiblemente carcinógena para los seres humanos.</li> </ul>

**Riesgo al ambiente**

- Formación de compuestos de nitrógeno. Valores superiores a 0.3 mg/l de nitrógeno inducen el crecimiento excesivo de algas
- Puede ser peligroso si entra en las tomas de agua.
- La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos.
- Puede acumularse en algunos peces que habitan aguas contaminadas, aunque no se espera que permanezcan en altos niveles por largo tiempo.
- Puede adherirse a partículas y ser transformada en días en compuestos menos nocivos.
- Se evapora fácilmente al aire, donde es degradada por reacciones en cuestión de minutos y horas.

**Datos sobre ecotoxicidad**

Especie	Tipo de prueba	Condiciones	Concentración	Efectos
<i>Brachydanio rerio</i> (Pez cebra; Cebra asiática): edad = 3 meses	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema estático</li> <li>• 20°C</li> <li>• pH = 7.6-8.2</li> <li>• 110 mg CaCO<sub>3</sub>/l</li> </ul>	• 2.03 mg/l por 24 h	
<i>Daphnia pulex</i> (Pulga de agua)	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema estático</li> <li>• 20°C</li> <li>• pH = 8.2</li> </ul>	• 1.16 mg/l por 24 h	
<i>Dunaliella tertiolecta</i> (Alga verde)	EC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema estático</li> </ul>	• 0.001 µl/l por 6 días	• Disminución de la abundancia
<i>Leuciscus idus melanotus</i> (Cacho)	LC <sub>50</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No especificadas</li> </ul>	• 0.75 mg/l por 48 h	

**Datos sobre toxicidad aguda en animales**

Organismo	Tipo de prueba	Vía de exposición	Dosis reportada
Roedor: rata	LD <sub>50</sub>	Oral	60 mg/kg
Roedor: rata	LC <sub>50</sub>	Inhalatoria	570 ppm/4 h

Tabla elaborada con información de la ficha de seguridad del producto (ILO, 2009) y de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) (s.f.). Los datos de ecotoxicidad y toxicidad fueron tomados de PubChem (s.f.-h).

Tabla D.15  
Características, toxicidad e impacto de la solución de fosfonatos.

<b>Compuesto Químico</b>	Dietil (3-bromopropil) fosfonato
<b>CAS</b>	• 1186-10-3
<b>Descripción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se observa biodegradación durante el tratamiento del agua.</li> <li>• La fotodegradación de los complejos de Fe (III) es rápida</li> </ul>

**Seguridad química**



<b>Usos y aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agente quelante e inhibidor de incrustaciones.</li></ul>
<b>Proceso en donde se utiliza</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• OI</li></ul>
<b>Riesgo al ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Baja toxicidad para los organismos acuáticos.</li><li>• Bajo factor de bioconcentración (FBC) en peces.</li></ul>
<b>Riesgo a la salud</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Provoca irritación cutánea y lesiones oculares graves.</li></ul>
<b>Datos sobre ecotoxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Para peces se reportan valores para LC<sub>50</sub>/48 h entre 0.1 y 1.1 mM.</li></ul>
<b>Datos sobre toxicidad</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• No se encontraron datos disponibles.</li></ul>

Tabla elaborada con información de Nowack (2003) y PubChem (s.f.-f).

## Anexo E – Entradas y salidas del inventario

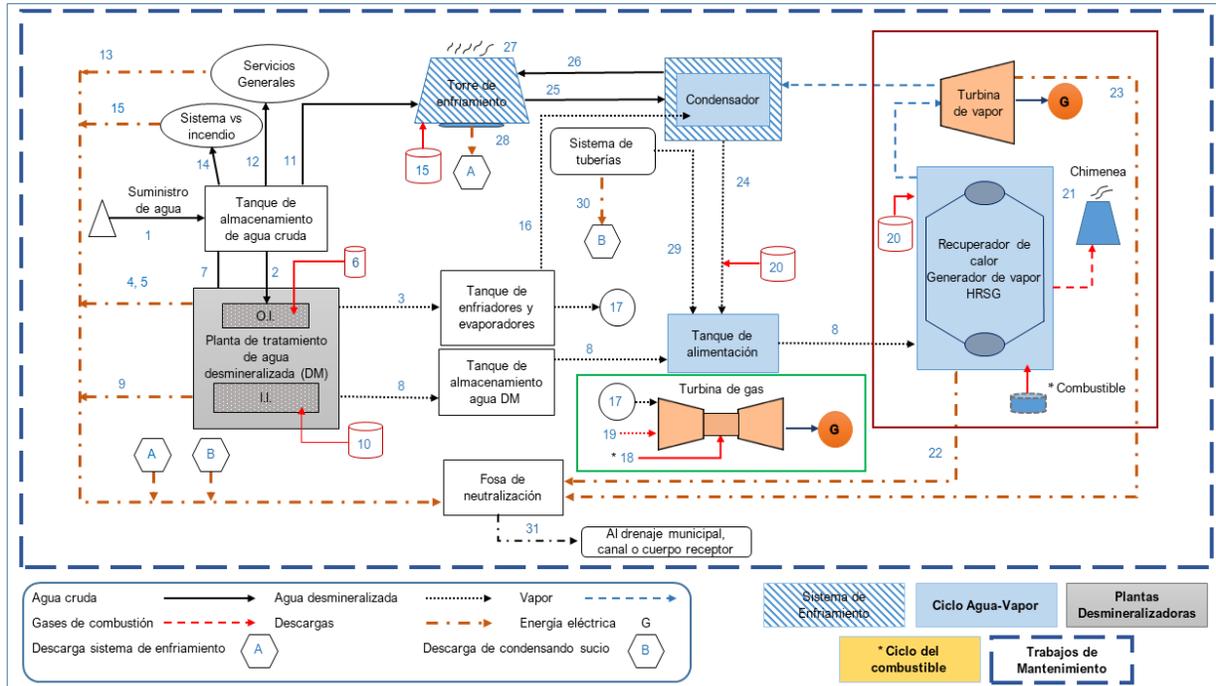


Figura E.1. Diagrama de bloques general asociado a las entradas y salidas del inventario.

Fuente: Elaboración propia.

Las entradas y salidas del inventario se muestran en la Tabla E.1 y corresponden a los principales sistemas representados en la Figura E.1.

Tabla E.1  
Entradas y salidas del inventario asociadas al diagrama de bloques

Equipo/Sistema	Proceso/Ciclo/Sistema	Flujo	Número	Descripción
<b>Tanque de almacenamiento de agua cruda</b>	Almacenamiento	Entrada	1	Suministro de agua
		Salida	2	Agua para planta tratamiento DM (OI)
		Salida	7	Agua para planta a tratamiento DM (II)
		Salida	11	Agua de repuesto T.E.
		Salida	14	Agua para sistema contraincendio
		Salida	12	Agua de servicios generales

Equipo/Sistema	Proceso/Ciclo/Sistema	Flujo	Número	Descripción
<b>Planta de tratamiento DM</b>				
	Osmosis inversa	Entrada	2	Agua cruda del tanque de almacenamiento de agua cruda
		Entrada	6	Químicos para membrana y regeneración del lecho mixto (31)
		Salida	3	Agua desmineralizada producida por OI al tanque de enfriadores y evaporadores
		Salida	4	Agua de rechazo y limpieza de membranas a la fosa de neutralización
		Salida	5	Agua sucia de la regeneración del lecho mixto a la fosa de neutralización
	Intercambio iónico	Entrada	7	Agua cruda del tanque de almacenamiento de agua cruda
		Salida	8	Agua desmineralizada producida por II al tanque de almacenamiento de agua DM
		Entrada	10	Compuestos químicos para la regeneración (32)
		Salida	9	Agua sucia de la regeneración a la fosa de neutralización
<b>Tanque de almacenamiento de agua DM</b>				
		Entrada	8	Agua DM producida en II
		Salida	8	Agua DM al tanque de alimentación
<b>Tanque de alimentación</b>				
		Entrada	8	Agua DM del tanque de almacenamiento agua DM
		Entrada	29	Agua DM del sistema de tuberías
		Entrada	24	Vapor de agua DM del condensador
		Salida	8	Agua DM a la caldera recuperadora de calor-generadora de vapor
<b>Tanque de enfriadores y evaporadores</b>				
		Entrada	3	Agua desmineralizada producida por OI
		Salida	16	Agua desmineralizada de reemplazo al condensador
		Salida	17	Agua DM al sistema de enfriamiento de la turbina de gas

Equipo/Sistema	Proceso/Ciclo/Sistema	Flujo	Número	Descripción
<b>Recuperador de calor-generador de vapor (HRSG)</b>				
		Entrada	8	Agua DM del tanque de alimentación
		Entrada		Gases de escape calientes al recuperador de calor
		Entrada	20	Compuestos químicos
		Entrada		En caso de plantas convencionales, se considera la entrada de combustible
		Salida		Vapor de agua DM
		Salida	21	Emisiones al aire —gases— por la combustión
		Salida	22	Purgas de fondo y superficie a la fosa de neutralización
<b>Caldera-turbina de vapor</b>				
	Ciclo agua-vapor	Entrada		Vapor de agua DM del HRSG
	Ciclo agua-vapor	Salida		Vapor residual de agua DM al condensador
	Ciclo agua-vapor	Salida	23	Condensado del vapor en los sellos de la turbina de vapor a la fosa de neutralización
<b>Condensador</b>				
	Ciclo agua-vapor	Entrada		Vapor residual de agua DM de la turbina de vapor
	Ciclo agua-vapor	Entrada	16	Agua DM de reemplazo del tanque de enfriadores y evaporadores
	Sistema de enfriamiento	Entrada	25	Agua cruda a temperatura ambiente de la torre de enfriamiento
	Ciclo agua-vapor	Entrada	20	Compuestos químicos
	Ciclo agua-vapor	Salida	24	Agua DM al tanque de alimentación
	Sistema de enfriamiento	Salida	26	Agua cruda a mayor temperatura a la torre de enfriamiento
<b>Torre de enfriamiento</b>				
	Sistema de enfriamiento	Entrada	26	Agua cruda a mayor temperatura
	Sistema de enfriamiento	Entrada	15	Compuestos químicos
	Sistema de enfriamiento	Entrada	11	Agua de repuesto del tanque de almacenamiento de agua cruda
	Sistema de enfriamiento	Salida	25	Agua cruda a temperatura ambiente

## Anexo E – Entradas y salidas del inventario

Equipo/Sistema	Proceso/Ciclo/Sistema	Flujo	Número	Descripción
	Sistema de enfriamiento	Salida	27	Perdida de agua por evaporación
	Sistema de enfriamiento	Salida	28	Purga del sistema de enfriamiento
<b>Sistema de tuberías</b>				
		Salida	29	Condensado limpio del sistema de tuberías al tanque de alimentación
		Salida	30	Condensado sucio a la fosa de neutralización
<b>Turbina de gas</b>				
		Entrada	17	Agua DM del tanque de enfriadores y evaporadores
	Combustión	Entrada	18	Combustible (gas natural en ciclo combinado)
	Combustión	Entrada	19	Aire
<b>Servicios generales</b>				
		Entrada	12	Agua cruda del tanque de almacenamiento
		Salida	13	Descarga a la fosa de neutralización
<b>Sistema contraincendio</b>				
		Entrada	14	Agua cruda del tanque de almacenamiento
		Salida	15	Descarga a la fosa de neutralización
<b>Fosa de neutralización</b>				
	Neutralización de químicos	Entrada	28	Purga del sistema de enfriamiento
		Entrada	30	Purgas del sistema de tuberías (Condensado sucio)
		Entrada	4	Agua de rechazo y limpieza de membranas
		Entrada	9	PT agua de regeneración II
		Entrada	13	Agua de servicios generales
		Entrada	15	Agua del sistema contra incendios
		Entrada	5	PT agua de regeneración OI lecho mixto
		Entrada	22	Purga de fondo y superficie del HRSG
		Entrada	23	Condensado de vapor en sellos
		Salida	31	Drenaje municipal