

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

**ESTUDIO DE CONTAMINANTES PRODUCIDOS EN LA INCINERACIÓN DE
POLÍMEROS PARA SU ELIMINACIÓN Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de ingeniería en
PREVENCIÓN DE RIESGOS
LABORALES Y AMBIENTALES

Alumno:

Sr. Maximiliano Canales Chueca

Profesor guía:

Sr. Sebastián Erick Amaro Belmar

RESUMEN

Keywords: DESECHOS PLÁSTICOS – INCINERACIÓN - VALORACIÓN - ENERGÉTICA.

El propósito de este trabajo es presentar información relevante sobre la contaminación por desechos plásticos y determinar la viabilidad de una solución específica, desarrollada en la teoría. En el capítulo 1 se definen los plásticos según su origen, pudiendo ser naturales, semisintéticos y sintéticos. Se presenta y explica la clasificación de la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI), en la cual se enumeran los plásticos del número 1 hasta el 7. Además de una breve descripción de la clasificación por comportamiento de los plásticos, pudiendo ser termoplásticos, termoestables o elastómeros. Además de datos respecto de la producción de estos materiales, con el fin de entender la envergadura del problema, como la producción a nivel mundial en 2018, de alrededor de 360 millones de toneladas. Debido a la naturaleza de los plásticos, los microorganismos no descomponen estos materiales y su permanencia en el medio ambiente es alta, del orden de cientos de años. Teniendo en cuenta, que hasta la fecha existen más de 8.300 millones de toneladas de estos desechos, tanto los entornos terrestres como los acuáticos, se han visto afectados de manera negativa.

En el capítulo 2 se muestra el marco legal referente al manejo y tratamiento de desechos plásticos, para su eliminación. Ley 19.300 MINSEGPRES, estipula entre otros, el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación y la protección del medio ambiente. Ley 21.100 MMA, prohíbe la entrega de bolsas plásticas de comercio en todo el territorio nacional. Además de la Ley 20.920 MMA, define conceptos como recolección, residuos, tratamiento, valorización y valorización energética. Determina las obligaciones de los gestores de residuos ya que, todo gestor deberá manejar los residuos de manera ambientalmente racional, aplicando las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales. Decreto Supremo 148 MINSAL, este reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reuso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

Finalmente, el Decreto Supremo 29 MMA, que establece norma de emisión para incineración, consideración y procesamiento.

Siendo el más extenso, el capítulo 3 aborda la solución postulada, en la cual se usa un proceso de incineración de desechos plásticos. Se entregan definiciones como compuestos orgánicos e inorgánicos, elementos alógenos, compuestos aromáticos, dioxinas y furanos. Las dioxinas y furanos son compuestos órgano clorados constituidos

por anillos de benceno y átomos de cloro como sustituyentes, estos compuestos son altamente tóxicos, bioacumulables, cancerígenos y mutagénicos. Si bien pueden generarse de forma natural como en incendios forestales, son principalmente producidos por el ser humano. La acción de incinerar plásticos, emite este tipo de compuestos tóxicos. Existen en teoría, 4 mecanismos de formación, siendo los más relevantes la conformación en fase gaseosa mediante precursores, generación por precursores por formación catalítica y la síntesis “De Novo”. Para mitigar y controlar la emisión de dioxinas y furanos se utilizan procesos como la incineración de doble cámara a más de 850 °C con una permanencia de los gases, superior a 2 segundos. Además de la adición de inhibidores químicos y la rápida disminución de la temperatura de los gases de salida. Luego se describen los procesos y los equipos utilizados, tales como calderas, intercambiadores de calor y turbinas de vapor.

En el último capítulo, el número 4 se aborda el aprovechamiento energético. Entregando definiciones de conceptos vinculados al proceso; sistemas, energía, energía interna, entalpía, calor, calor específico, poder calorífico, trabajo, potencia y eficiencia. Con los datos requeridos como el poder calorífico de los plásticos y las eficiencias de los equipos necesarios, se calcula la energía eléctrica que puede ser producida con un flujo másico (teóricamente seleccionado) de un material, en este caso PVC. Este tiene un poder calorífico de 5,0 Mcal/kg, suponiendo 100 kg de este material por 2 turnos de 8 horas, por cada día durante 20 días con el valor aproximado de 1 kWatt*h, el valor estimado de venta de la energía es de \$21.618.035,712.

ÍNDICE

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS 3

OBJETIVO GENERAL 3

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

ALCANCE 4

METODOLOGÍA..... 5

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES..... 6

1.1. PLÁSTICOS 7

1.1.1. Plásticos naturales 7

1.1.2. Plásticos semisintéticos 8

1.1.3. Plásticos sintéticos 8

1.2. COMPUESTOS ORGÁNICOS..... 9

1.2.1. Compuestos orgánicos de origen natural..... 9

1.2.2. Compuestos orgánicos de origen sintético 9

1.2.3. Compuestos inorgánicos..... 10

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS..... 10

1.3.1. Clasificación de la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI) 10

1.3.2. Clasificación según el comportamiento de los polímeros 11

1.4. PRODUCCIÓN GLOBAL DE PLÁSTICOS 13

1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 15

1.5.1. Contaminación a nivel global 15

1.5.2. Envío de desechos plásticos entre países..... 16

1.5.3 Contaminación a nivel nacional..... 17

1.5.4. Contaminación de los océanos..... 19

CAPÍTULO 2: MARCO LEGAL..... 21

2.1. LEY 19.300 MINSEGPRES..... 22

2.1.1. TITULO I Disposiciones Generales..... 22

2.1.2. TITULO III De la Responsabilidad por Daño Ambiental..... 24

2.1.3. TITULO V Del Fondo de Protección Ambiental 24

2.2. LEY 21.100 MMA 24

2.3. LEY 20.920 MMA 25

2.3.1. TÍTULO I Disposiciones Generales..... 25

2.4.	DECRETO SUPREMO 148 MMA	27
2.4.1.	TITULO I Disposiciones Generales.....	28
2.4.2.	Párrafo IV De la Incineración	29
2.5.	DECRETO SUPREMO 29 MMA	30
2.5.1.	TÍTULO PRIMERO Disposiciones Generales	30
2.5.2.	TÍTULO TERCERO Condiciones de operación	31
 CAPÍTULO 3: TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....		32
3.1.	DEFINICIONES	33
3.1.1.	Compuestos Orgánicos Persistentes.....	33
3.1.2.	Elementos halógenos.....	33
3.1.3.	Compuestos orgánicos halogenados.....	34
3.1.4.	Compuestos aromáticos.....	34
3.2.	DIOXINAS Y FURANOS	35
3.2.1.	Fuentes de polución.....	36
3.2.2.	Mecanismos de formación.....	36
3.2.3.	Atenuación y control	39
3.3.	MATERIAL DE INGRESO	42
3.3.1.	Características relevantes de los plásticos	42
3.4.	PROCESO DE INCINERACIÓN	44
3.4.1.	Reseña internacional	44
3.4.2.	Reseña nacional.....	48
3.4.3.	Descripción del proceso	50
3.4.4.	Equipos necesarios	55
 CAPÍTULO 4: APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO		65
4.1.	CONCEPTOS	66
4.1.1.	Sistema	66
4.1.2.	Energía.....	67
4.1.3.	Energía interna.....	67
4.1.4.	Entalpía.....	68
4.1.5.	Calor	68
4.1.6.	Calor específico.....	68
4.1.7.	Poder calorífico.....	69
4.1.8.	Trabajo.....	70
4.1.9.	Potencia	71
4.1.10.	Eficiencia	71
4.2.	TRANSFORMACIÓN A ENERGÍA ELÉCTRICA	72

4.2.1. Datos requeridos 72

4.2.2. Cálculos 73

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 75

BIBLIOGRAFÍA 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. El caucho corresponde a un polímero de origen natural.	7
Figura 1-2. Trabajo de fresado en pieza de Nilón.	8
Figura 1-3. Plásticos con diferentes colores en formato “pellet”.	9
Figura 1-4. La identificación de los diversos objetos de plástico recuperables.	11
Figura 1-5. Representación gráfica de los tipos de plásticos.	12
Figura 1-6. Comparación datos resumidos (agregados), sobre la magnitud de plásticos producidos a nivel mundial, entre los años 2017 y 2018.	13
Figura 1-7. Producción mundial de plásticos en el año 2018.	14
Figura 1-8. Producción mundial de plásticos del año 2017.	14
Figura 1-9. Productos plásticos típicos.	16
Figura 1-10. Ejemplificación con datos reales, consumo aparente en Chile año 2018.	18
Figura 1-11. Giros oceánicos de la Tierra.	20
Figura 3-1. El benceno (C ₆ H ₆)	34
Figura 3-2. Estructura química general de dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF).	35
Figura 3-3. Fenol, clorobenceno, clorofenol y cloruro de hidrógeno de izquierda a derecha respectivamente.	37
Figura 3-4. Planta incineradora en Alemania.	45
Figura 3-5. Planta incineradora en Dinamarca.	45
Figura 3-6. Planta incineradora en España.	46
Figura 3-7. Planta incineradora en Noruega.	46
Figura 3-8. Planta incineradora en Suecia.	47
Figura 3-9. Diseño general de una planta incineradora.	48
Figura 3-10. Diseño del proyecto WTE Araucanía.	49
Figura 3-11. Diseño de horno incinerador, empresa Hornos Industriales LTDA.	49
Figura 3-12. Ejemplo del funcionamiento de una caldera acuotubular.	51
Figura 3-13. Diseño de ciclón de gases.	52
Figura 3-14. Diseño de precipitador electrostático.	52
Figura 3-15. Diseño de precipitador electrostático 1.	53
Figura 3-16. Ecuación de reacción general de combustión, con C, H, O, N, S y Cl y oxígeno estequiométrico.	53
Figura 3-17. Relación de oxígeno en el proceso de combustión.	54
Figura 3-18. Hornos de incineración, horno de parrilla móvil (a), horno rotatorio (b), horno de lecho fluidizado (c) y horno de pisos (d).	57

Figura 3-19. Hornos de incineración de inyección líquida.	58
Figura 3-20. Sistemas típicos de un horno de incineración.	59
Figura 3-21. Caldera acuotubular con disposición vertical.	60
Figura 3-22. Funcionamiento de una caldera pirotubular.	60
Figura 3-23. Intercambiador de calor de tipo carcasa y tubos.	62
Figura 3-24. Intercambiador de calor de placas.	62
Figura 3-25. Partes internas de una turbina de vapor.	63
Figura 3-26. Ejemplo de álabes fijos y móviles.	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Tabla de datos exportación de desechos plásticos.	17
Tabla 1-2. Tabla de datos de importación de desechos plásticos.	17

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1. Evolución del consumo aparente de plásticos en Chile,	18
Gráfico 1-2. Resumen industria del plástico en Chile año 2018.	19

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

%	: Porcentaje
Δ	: Delta, usada como variación o diferencia
°C	: Grados Celsius
ABS	: Acrilonitrilo butadieno estireno
ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
BBC	: Corporación de Emisiones Británica
C	: Carbono
C ₁₀ H ₈	: Naftalina
C ₆ H ₆	: Benceno
Cal	: Calorías
CaO	: Óxido de calcio
CH ₄ N ₂ O	: Urea
CIS	: Comunidad de Estados Independientes
Cl	: Cloro
Cl ₂	: Cloro molecular o diatómico
cm ³	: Centímetros cúbicos
CO ₂	: Dióxido de carbono
COP	: Compuestos Orgánicos Persistentes
Cu	: Cobre
Cu ₂ O	: Óxido de cobre
CuCl ₂	: Cloruro de cobre
CuO	: Óxido de cobre
CuSO ₄	: Sulfato de cobre
DS	: Decreto Supremo
EPS	: Poliestireno expandido
Fe	: Hierro
g	: Gramos
H	: Hidrógeno
H ₂ O	: Agua
HCl	: Cloruro de hidrógeno
HDPE	: Polietileno de alta densidad
J	: Julios
K	: Grados Kelvin
k	: Prefijo Kilo, equivalente a 10 ³
LDPE	: Polietileno de baja densidad

LTDA	: Sociedad de Responsabilidad Limitada
M	: Prefijo Mega, equivalente a 10^6
MINSAL	: Ministerio de Salud
MINSEGPRES	: Ministerio Secretaria General de la Presidencia
mm Hg	: Milímetros de mercurio
MMA	: Ministerio del Medio Ambiente
η	: Eficiencia
N	: Nitrógeno
N ₂	: Nitrógeno molecular
NAFTA	: Tratado de Libre Comercio de América del Norte
NH ₃	: Amoníaco
Nº	: Número
O	: Oxígeno
O ₂	: Oxígeno molecular o diatómico
p.	: Página
PA	: Poliamidas
PC	: Policarbonato
PCB	: Policlorobifenilos
PCDD	: Dibenzo-p-dioxinas policloradas
PCDF	: Dibenzofuranos policlorados
PCI	: Poder calorífico inferior
PCS	: Poder calorífico superior
PE	: Polietileno
PET	: Polietileno tereftalato
PMMA	: Polimetilmetacrilato
PP	: Polipropileno
PS	: Poliestireno
PUR	: Poliuretano
PVC	: Policloruro de vinilo
RAE	: Real Academia Española
rpm:	: Revoluciones por minuto
RSU	: Residuos Sólidos Urbanos
S	: Azufre
s	: Segundos
S.A.	: Sociedad Anónima
s.f.	: Sin fecha
SAN	: Estireno acrilonitrilo
SI	: Sistema Internacional de unidades

SO2	: Dióxido de azufre
SO3	: Trióxido de azufre
TCDD	: Tetracloro-dibenzo-p-dioxina
TNA	: Evaluación de Necesidades Tecnológicas
tons	: Toneladas
TRS	: Azufre Reducido Total
Watt	: Vatios
λ	: Lambda, usada como relación de oxígeno

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra y sus habitantes, se encuentran sometidos a fuertes cambios climáticos y de contaminación ambiental. Una de las causas de tales cambios corresponde a la emisión de gases de efecto invernadero; “calentamiento global, se refiere a la tendencia a incrementar que durante los últimos 150 años ha mostrado la temperatura global del planeta, fenómeno que se atribuya al efecto de la contaminación humana” (Caballero et al., 2007, p. 3).

Respecto de la contaminación, una parte importante del problema de los residuos son los polímeros sintéticos generados por la industria, llamados comúnmente plásticos. Omitiendo los proto-plásticos de orinen natural (con mayor antigüedad), el siglo XIX es el señalado como punto de partida para los materiales plásticos; “en 1839, Charles Goodyear remata la fase originada por Handcock, pues consigue transformar accidentalmente el caucho crudo en una material resistente y elástico al vulcanizarlo con azufre” (García, 2009, p. 72). Posteriormente, durante el siglo XX, comienza la carrera en la producción de plásticos. El problema radica en las ventajas de estos materiales, su costo, versatilidad, su resistencia, plasticidad y peso, entre otras, lograron que se masificara su uso. Pero, ¿qué ocurrió luego de esta producción en gran escala? la respuesta fue un medio ambiente contaminado por desechos que, en la mayoría de los casos, no han sido tratados.

Las enormes cantidades de plástico acumuladas en suelos afectan la flora y fauna. Este escenario se replicó en los océanos del mundo con consecuencias negativas, ya que las formas y colores de estos desechos confunden a los animales acuáticos que, en ciertos casos, los consideran alimento. Por otra parte, algunos desechos que no son consumidos como alimento por la fauna del lugar, flotan dificultando el ingreso de luz y gases en ciertas zonas de los cuerpos de agua (principalmente océanos).

Por estas razones es que se realiza esta investigación, para contribuir a la mitigación del problema. Lo que se pretende, es determinar si es posible o no, tratar los plásticos mediante incineración, evitando la generación de compuestos tóxicos o al menos disminuyéndola en gran medida. Tomando en cuenta además, la energía producida en el proceso de incineración, la cual podría ser utilizada mediante su transformación, por ejemplo en energía eléctrica.

En consecuencia, se definen las sustancias peligrosas generadas en el proceso de incineración, las cuales se denominan dioxinas y furanos. La emisión de estos compuestos, es el problema principal del método de incineración. Se mencionan los mecanismos de formación de estas sustancias tóxicas, las situaciones que la favorecen y métodos con los cuales se inhibe, o al menos, de dificulta dicha formación. Se señalan

además, aspectos relacionados a los equipos utilizados para los procesos y finalmente, cálculos breves respecto de la energía eléctrica que podría ser generada, debido al poder calorífico de los materiales plásticos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar los contaminantes producidos en la incineración de polímeros para su eliminación y valorización energética.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un levantamiento de información sobre la generación de desechos plásticos.
- Describir el estado del arte respecto a la incineración de polímeros a nivel nacional e internacional.
- Realizar evaluación técnico-económica del sistema propuesto.

ALCANCE

El desarrollo de este trabajo tiene como alcance, el compendio de argumentos que avalen un procedimiento para el tratamiento de desechos plásticos de manera segura, evitando o disminuyendo la emisión de gases tóxicos a la atmósfera. Desarrollar en teoría los cálculos, para el aprovechamiento de la energía producida durante dicho proceso. Es decir, que se busca realizar un documento, el cual responda a las preguntas ¿es posible solucionar de manera segura el problema de los desechos plásticos, que actualmente afectan a nuestra sociedad? y si la respuesta es sí, ¿es posible utilizar dicha solución para producir energía, logrando así un beneficio económico?

El método que se propone es una incineración a altas temperaturas, en el cual los compuestos tóxicos se separen en partículas menos complejas. En relación al aprovechamiento energético, este apunta a la utilización del calor liberado durante el proceso de incineración, mencionando y describiendo aquellos equipos afines a la tarea. Además, se recogen, organizan y presentan conceptos físicos que permiten una futura continuación de este trabajo o para abordar distintas formas de realizar cálculos. Dando de esta forma, la opción a terceros para que usen esta información y puedan desarrollar etapas posteriores.

METODOLOGÍA

La metodología a utilizar en este estudio corresponde a la recopilación de información de fuentes secundarias. Esto, mediante investigación de escritorio (Desk Research). El primer paso será buscar documentos validados, textos científicos, artículos de periódicos digitales y principalmente memorias de título, para establecer las siguientes etapas:

- Etapa 1: Antecedentes generales. Presentación del problema de la contaminación por desechos plásticos, entrega de antecedentes como el daño producido al medio ambiente, volumen estimado, características y uso de estos materiales.
- Etapa 2: Marco legal. Cuerpos legales de la actual legislación, obtenidos desde la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Los cuales entregan los lineamientos respecto al cuidado del medio ambiente (Ley 19.300 MINSEGPRES), prohibiciones y responsabilidades (Ley 21.100 MMA y Ley 20.920 MMA) además del estándar en la incineración de residuos y requerimientos de las instalaciones que realicen el proceso (DS 29 MINSAL y DS 148 MINSAL).
- Etapa 3: Tratamiento de residuos. Presentación de la incineración de residuos plásticos como solución, dificultades asociadas a la práctica de esta, sustancias producidas y sus mecanismos de formación, equipos afines, entre otros.
- Etapa 4: Aprovechamiento energético. Definición de conceptos, ecuaciones y cálculos respecto a la energía que se libera en un proceso de incineración y su transformación para ser utilizada. En el aprovechamiento energético se aplican procesos que minimizan el volumen de residuos, en los cuales puede generarse energía.

Una vez obtenida toda la información necesaria, se procederá a organizar dicha información y se establecerá un método, para tratar desechos plásticos, de manera segura para la salud de las personas y el medio ambiente.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. ANTECEDENTES GENERALES

En este capítulo se define la situación presente del problema de la contaminación por desechos plásticos, se entregan antecedentes generales tales como el volumen estimado de los desechos hasta la fecha, el ¿por qué? de su extenso uso, daño a los océanos, entre otros.

1.1. PLÁSTICOS

Corresponden a materiales constituidos por una variedad de compuestos. Pueden ser de origen orgánico, semisintético y sintético. Su nombre se debe a su plasticidad, una propiedad característica notoria de estos materiales.

1.1.1. Plásticos naturales

Aquellos presentes en la naturaleza (reino vegetal y animal). Algunos ejemplos son la celulosa y el caucho natural, mostrado en la figura 1-1.



Fuente: <https://www.comunicarseweb.com/noticia/lanzan-la-plataforma-global-para-el-caucho-natural-sostenible>.

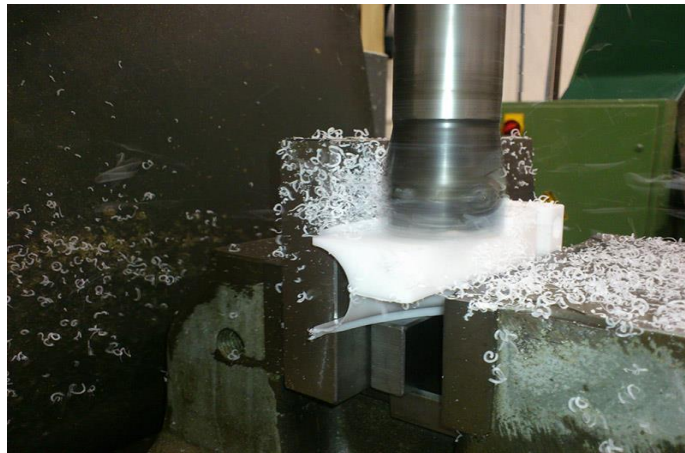
Figura 1-1. El caucho corresponde a un polímero de origen natural. Se obtiene del árbol de caucho natural (*Hevea Brasiliensis*).

1.1.2. Plásticos semisintéticos

Aquellos obtenidos por la transformación química de los polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular. Ejemplo de estos, es la seda artificial obtenida a partir de la celulosa.

1.1.3. Plásticos sintéticos

Aquellos que se obtienen a través de métodos sintéticos a partir de sustancias de bajo peso molecular. Un ejemplo de polímero sintético es el Nilón, figura 1-2.



Fuente: <https://www.metransa.com/piezas-actualmente-en-fabricacion/>.

Figura 1-2. Trabajo de fresado en pieza de Nilón. Debido a las características de este tipo de plástico, es posible realizar procesos de mecanizado sobre el mismo.

Los polímeros (figura 1-3), están constituidos por macromoléculas formadas por la unión de una o más unidades simples llamadas monómeros. Estos forman largas cadenas que se unen entre sí. Un monómero es una molécula de pequeña masa molecular que está unida a otros monómeros, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, que forman las ya mencionadas macromoléculas.



Fuente: <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>.

Figura 1-3. Plásticos con diferentes colores en formato “pellet”.

1.2. COMPUESTOS ORGÁNICOS

Son aquellos compuestos, que tiene como elemento principal el carbono y presenta enlaces covalentes de carbono e hidrógeno. En muchos casos contienen oxígeno, nitrógeno, azufre, halógenos como el boro y otros elementos menos frecuentes en su estado natural.

Algunas características de estas sustancias son las siguientes:

- Son combustibles.
- Poseen poca solubilidad en agua.
- Están presentes en la materia viva.
- Pueden ser de origen natural o sintético.

De esta última se desprende:

1.2.1. Compuestos orgánicos de origen natural

Son las sintetizadas por los seres vivos, y se llaman biomoléculas, las cuales son estudiadas por la bioquímica.

1.2.2. Compuestos orgánicos de origen sintético

Son sustancias que han sido fabricadas por el hombre.

1.2.3. Compuestos inorgánicos

Se denomina compuestos químicos inorgánicos a aquellos que están formados por distintos elementos, pero en los que su componente principal, no siempre es el carbono. Estos son inertes, las moléculas inorgánicas pueden ser constituidas por la mayoría de los elementos conocidos. Su formación se produce de manera ordinaria por la acción de varios fenómenos físicos y químicos.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Estos materiales pueden ser clasificados de diversas formas, en los títulos siguientes se muestran:

- Clasificación de la Sociedad de Industrias del Plástico (Society of the Plastics Industry) o SPI.
- Clasificación según el comportamiento de los polímeros.

1.3.1. Clasificación de la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI)

El sistema de codificación de la SPI es un medio para identificar los objetos de plástico aceptada mundialmente. La Sociedad de Industrias del Plástico fundada en 1937, fue actualizada en 2010 por SPI: Asociación de Comercio de la Industria del Plástico (The Plastics Industry Trade Association). Esta organización desarrolló el sistema de Código de Identificación de Resinas (RIC), una forma para clasificar los diferentes tipos de plásticos en los residuos en 1988. El sistema RIC asigna un número de 1 a 7, con símbolos de flechas curvas que rodean tales números (como se aprecia en la figura 1-4), a una pieza de plástico que indica su tipo. Entendiendo la importancia de la participación de la comunidad técnica de interesados en la actualización y mantenimiento del RIC, en el año 2008, la SPI se acercó a ASTM Internacional para que el sistema RIC sea adoptado como norma de ASTM.



Fuente: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND10/d2095_spnd10.html.

Figura 1-4. La identificación de los diversos objetos de plástico recuperables.

Se logra observando el código SPI, que aparece rodeado de tres flechas curvas. En su interior aparece un número y en la parte inferior del mismo unas siglas. Tanto el número como las siglas hacen referencia a la composición química del plástico. La gran mayoría de los objetos de plástico se hacen con una de estos seis polímeros. Se incluye en el código la identificación número 7, correspondiente a "otros".

1.3.2. Clasificación según el comportamiento de los polímeros

La familia de los plásticos está compuesta por una amplia variedad de materiales, estos están diseñados para satisfacer los diferentes requisitos de rendimiento de cada producto. Se encuentran 3 grupos, termoplásticos, plásticos termoestables y plásticos elastómeros.

Los termoplásticos son aquellos plásticos que pueden ser derretidos cuando se calientan y al enfriarse, se endurecen. Estas características son reversibles, es decir, se puede recalentar y reformar repetidamente. Algunos de estos polímeros son:

- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno tereftalato (PET)
- Poliestireno (PS)
- Poliestireno expandido (EPS)
- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
- Estireno acrilonitrilo (SAN)
- Poliamidas (PA)
- Policarbonato (PC)
- Polimetilmetacrilato (PMMA)

Luego se encuentran, los plásticos termoestables, que son aquellos plásticos que sufren cambios químicos cuando son sometidos a calor, creando una red tridimensional. Después de que son calentados y conformados, estos plásticos no se pueden volver a fundir y reformar. Ejemplos de estos polímeros:

- Poliuretano (PUR)
- Poliéster insaturado
- Silicona
- Resina epoxi
- Resina urea formaldehído

Finalmente, los plásticos elastómeros son aquellos plásticos que muestran (principalmente) características tales como, alta elongación o elasticidad y flexibilidad frente al sometimiento de esfuerzos, antes de fracturarse o romperse.

A continuación, se muestra en la figura 1-5, la representación de estos 3 tipos de polímeros:



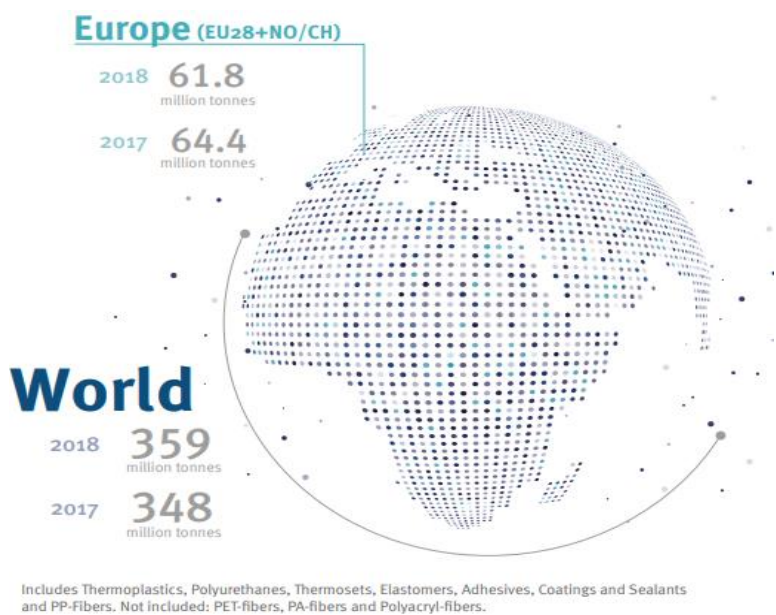
Fuente: <https://www.losadhesivos.com/elastomero.html>.

Figura 1-5. Representación gráfica de los tipos de plásticos.

Según su clasificación. En esta figura se representan las cadenas que conforman varios monómeros (polímeros) como cuerdas.

1.4. PRODUCCIÓN GLOBAL DE PLÁSTICOS

Debido a las características y al negocio detrás de estos materiales, existe una gran demanda mundial. En la figura 1-6, se muestran datos comparativos de los años 2017 y 2018, respecto de la producción mundial de plásticos, la cual en el año 2018 casi alcanzó los 360 millones de toneladas. Mientras que, en Europa la producción de plásticos del mismo año, llegó casi a 62 millones de toneladas.



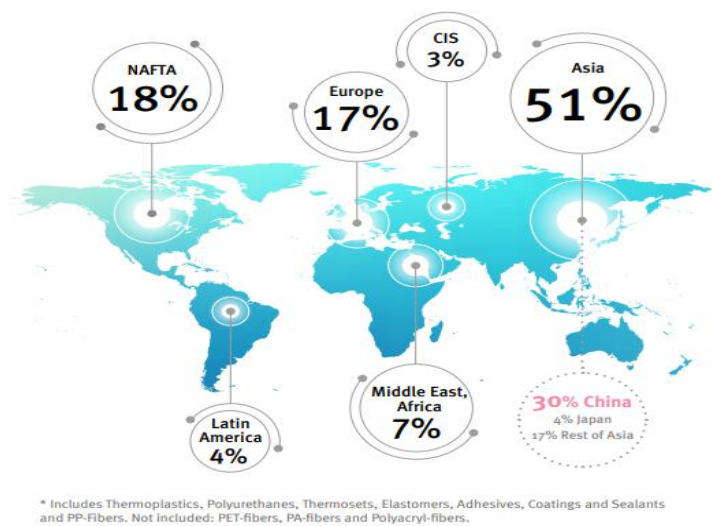
Fuente:

https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf.

Figura 1-6. Comparación datos resumidos (agregados), sobre la magnitud de plásticos producidos a nivel mundial, entre los años 2017 y 2018.

Se incluyen termoplásticos, Poliuretanos, termoestables, Elastómeros, Adhesivos, revestimientos, selladores y fibras de Polipropileno. No se incluyen fibras de Polietileno Tereftalato, fibras de Poliamidas ni fibras de Poliacrílico.

En la distribución de la producción mundial de plásticos en el año 2018, como se aprecia en la figura 1-7, que China alcanzó el 30% de la producción mundial de plásticos, es decir el 30% de 359 millones de toneladas.



Fuente:

https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf.

Figura 1-7. Producción mundial de plásticos en el año 2018.

Los acrónimos NAFTA y CIS se entienden como Tratado de Libre Comercio de América del Norte (North American Free Trade Agreement) y Comunidad de Estados Independientes (Commonwealth of Independent States), respectivamente.

Como es de esperarse, en el año 2018 se incrementó la producción mundial de plásticos respecto de años anteriores. En comparativa se muestra la figura 1-8, con datos del año 2017.



Fuente: <https://mundoplast.com/produccion-mundial-plasticos-2017/>.

Figura 1-8. Producción mundial de plásticos del año 2017.

Los acrónimos NAFTA y CIS se entienden como Tratado de Libre Comercio de América del Norte (North American Free Trade Agreement) y Comunidad de Estados Independientes (Commonwealth of Independent States), respectivamente.

1.5. **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La contaminación por desechos plásticos es uno de los grandes problemas ambientales que enfrentamos hoy en día, organismos internacionales publican artículos y resultados de investigaciones, aludiendo al tema como de suma importancia.

Los materiales plásticos no se degradan con facilidad, sino que tardan una gran cantidad de años. “Los microorganismos no conocen estos materiales, por lo que no los digieren, permaneciendo ahí por miles de años” (Perdomo, 2002, p. 5). Impactando directamente en el medio ambiente y por consecuencia, en nuestra salud.

El problema de la contaminación por desechos plásticos se ha presentado por la gran producción y el amplio uso de estos materiales, pueden ser encontrados en la vida cotidiana, como en vestimenta, electrodomésticos, utensilios, herramientas, envases de alimentos, etc. Además, son utilizados en la industria y el sector productivo, para el procesamiento de otros bienes. Debido a esto, el medio ambiente se ha visto afectado por estos desechos no tratados. El impacto se reconoce en las enormes cantidades de plástico acumuladas en suelos y océanos del mundo, afectando la flora y fauna. En muchos casos, los desechos son consumidos como alimento por algunos animales, provocado su muerte; con alteraciones en la cadena trófica. Por otra parte, aquellos desechos que no son consumidos por la fauna del lugar, se acumulan en los entornos naturales produciendo contaminación y dificultando las interacciones naturales.

1.5.1. **Contaminación a nivel global**

Estos desechos, ejemplificados en la figura 1-9, han generado un problema de magnitud global. La “cultura de lo desechable”, el leve compromiso por algunas partes del sector industrial (además del sector político y la ciudadanía) y el poco entendimiento sobre el desarrollo sostenible, dieron como resultado la situación actual.



Fuente: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO08/wilhelm_sps08.html.

Figura 1-9. Productos plásticos típicos.

Luego de que sus contenidos son usados, estos objetos (comúnmente envases) son desechados. Sin importar la longevidad que los caracteriza.

La producción de plásticos sintéticos, comienza en el siglo XIX. Respecto del volumen de estos desechos, se estima que hay presentes más de 8.300 millones de toneladas a la fecha; “Gracias a que el plástico no se inventó hasta finales del siglo XIX, y hasta mediados del XX no empezó a producirse a gran escala, solamente tenemos que lidiar con 8.300 millones de toneladas de este material. De ellas, más de 6.300 millones se han convertido en residuos” (Parker, 2019).

1.5.2. Envío de desechos plásticos entre países

Dentro de las actividades económicas de algunos países del mundo, existe el traslado de desechos de diversos tipos (compraventa de desechos). En algunos casos el objetivo es aplicar procesos de reciclaje, en otros solo se almacenan.

A continuación, se muestra la tabla 1-1 la cual indica a los países con mayor envío de estos materiales:

Tabla 1-1. Tabla de datos exportación de desechos plásticos.

Países con mayor exportación de desechos plásticos al extranjero en (kg)	
Lugar	Cantidad
Estados Unidos de América	961.563.000
Japón	891.719.000
Alemania	733.756.000
Reino Unido	548.256.000

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Núñez-Torrón, 2019.

La siguiente, tabla 1-2, señala a los países con mayor recepción de estos materiales:

Tabla 1-2. Tabla de datos de importación de desechos plásticos.

Países con mayor importación de desechos plásticos en (kg)	
Lugar	Cantidad
Malasia	913.165.000
Tailandia	471.724.000
Vietnam	443.615.000
Hong Kong	398.261.000

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Núñez-Torrón, 2019.

1.5.3 Contaminación a nivel nacional

Como era de esperarse, el daño ambiental ha afectado el territorio nacional. “En Chile se consumen 3.400 millones de bolsas de plástico al año, según información del Gobierno. De estas, el 97% va a parar a vertederos y rellenos sanitarios, es decir, no se recicla “(di Girolamo, 2018). También es importante tener en cuenta lo que cada persona contamina; “3,7 kilos de residuos plásticos producen una persona al mes” (Álvarez, 2019), entiéndase kilogramos de residuos.

Además, a nivel nacional solo se “reciclan 83.679 tons/año, equivalentes a un 8,5% del plástico que se consume (990.000 tons/año)” (Asociación Gremial de Industriales del Plástico, 2019). Estas aproximadamente 990.000 toneladas de plástico por año, corresponden al denominado consumo aparente.

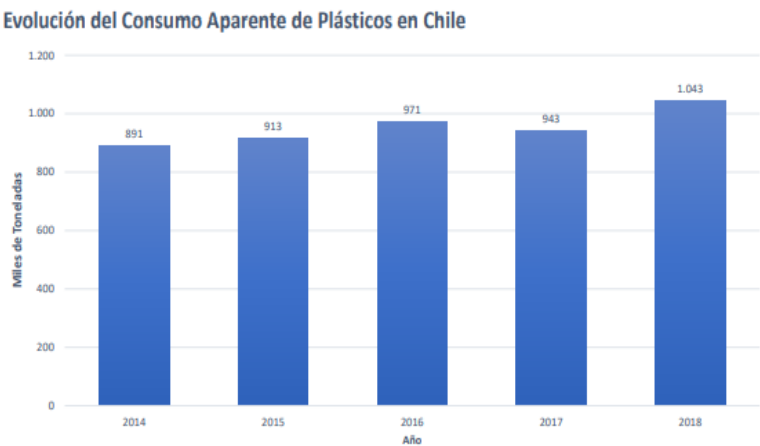
El consumo aparente se entiende como el consumo de materias primas sumados a la importación manufacturas, a lo cual se le sustrae la exportación de manufacturas. Como se ve en la figura 1-10.



Fuente: <http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2019/10/Informe-Estad%C3%ADstico-A%C3%B1o-2018-y-Primer-Semestre-2019-Resumen-Ejecutivo.pdf>.

Figura 1-10. Ejemplificación con datos reales, consumo aparente en Chile año 2018.

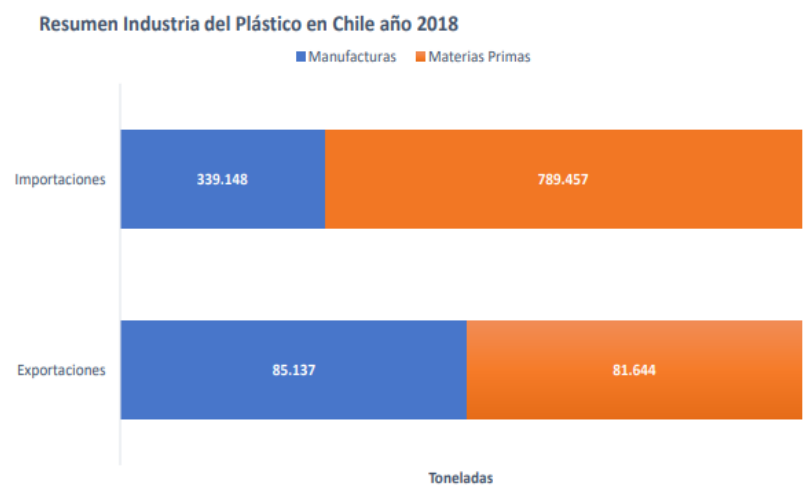
Para entender mejor la figura 1-10, se requieren los datos de las Gráficos 1-1 y 1-2. Las cuales se muestran a continuación:



Fuente: <http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2019/10/Informe-Estad%C3%ADstico-A%C3%B1o-2018-y-Primer-Semestre-2019-Resumen-Ejecutivo.pdf>.

Gráfico 1-1. Evolución del consumo aparente de plásticos en Chile.

Grafico se muestra como apoyo a figura 1-10, Luego:



Fuente: <http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2019/10/Informe-Estad%C3%ADstico-A%C3%B1o-2018-y-Primer-Semestre-2019-Resumen-Ejecutivo.pdf>.

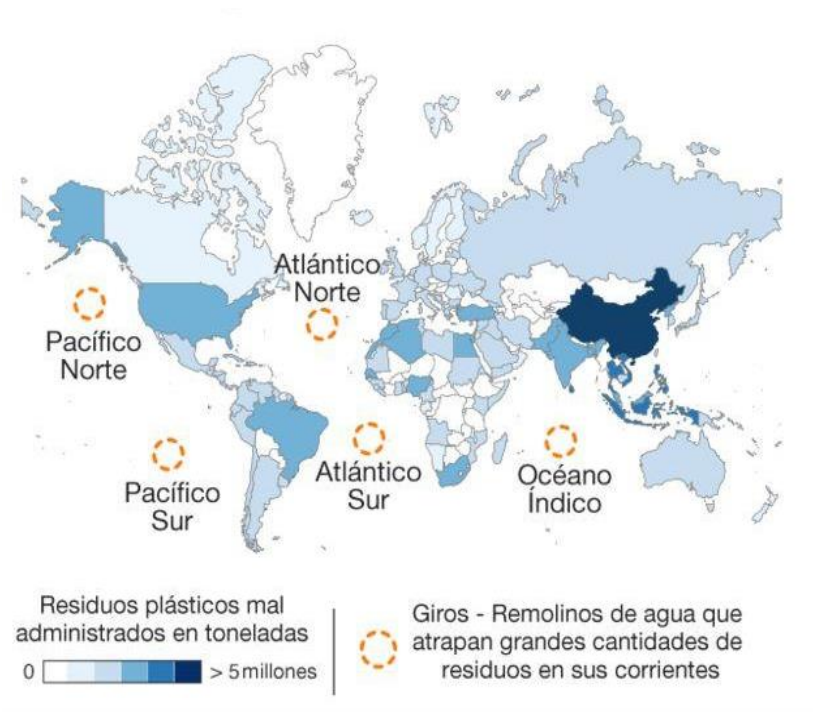
Gráfico 1-2. Resumen industria del plástico en Chile año 2018, en apoyo a figura 1-10.

Continuando en referencia a la contaminación, “del total de plásticos reciclados, un 17% (14.281 ton/año) son de origen domiciliario y un 83% (69.398 ton/año) de origen no domiciliario” (Asociación Gremial de Industriales del Plástico, 2019). De esta cifra (14.281 toneladas por año), “el reciclaje de plástico de origen domiciliario se concentra en PET, con un 55% (7.889 ton/año). El resto (6.392 ton/año) es principalmente PE/PP” (Asociación Gremial de Industriales del Plástico, 2019).

1.5.4. Contaminación de los océanos

Los océanos son el destino final de muchos de los desechos, donde perjudican severamente la salud de los ecosistemas acuáticos y la supervivencia de las especies que los habitan. Los océanos del mundo están siendo afectados continuamente, “se estima que alrededor de 10 millones de toneladas de plástico acaban en los océanos cada año” (BBC Mundo, 2017). Dando como resultado una acumulación estimada de 270.000 toneladas; “Un estudio internacional concluyó que más de 5 billones de trozos de plástico, con un peso aproximado de 270.000 toneladas, flotan en los océanos” (BBC Mundo, 2014). Debido a las corrientes naturales, los desechos plásticos que yacen en el mar tienden a acumularse en los giros oceánicos. “La basura plástica se acumula en áreas del océano donde los vientos crean corrientes circulares, conocidas como giros, que absorben

cualquier residuo flotante.” (BBC Mundo, 2017). En la figura 1-13, se muestran estos grandes sistemas de corrientes marinas rotativas, que están relacionadas con el movimiento de rotación terrestre:



Fuente: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-42304901>.

Figura 1-11. Giros oceánicos de la Tierra.

En estos lugares, tienden a acumularse los desechos plásticos que son arrojados a los océanos.

CAPÍTULO 2: MARCO LEGAL

2. **MARCO LEGAL**

A continuación, se presentan algunos cuerpos legales de la actual legislación chilena, relacionados al tema tratado. Por razones prácticas, solo se muestran algunos elementos (párrafos, artículos, letras, etc.), los más relevantes.

- Ley 19.300 MINSEGPRES
- Ley 21.100 MMA
- Ley 20.920 MMA
- Decreto Supremo 148 MINSAL
- Decreto Supremo 29 MMA

2.1. **LEY 19.300 MINSEGPRES**

- Denominación: Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente (fragmento).
 Fecha de promulgación : Marzo 1, año 1994.
 Fecha de publicación : Marzo 9, año 1994.
 Organismo : Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

2.1.1. **TITULO I Disposiciones Generales**

Artículo 1°. - El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.

Artículo 2°. - Para todos los efectos legales, se entenderá por:

a ter) Cambio Climático: se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

b) Conservación del Patrimonio Ambiental: el uso y aprovechamientos racionales o la reparación, en su caso, de los componentes del medio ambiente,

especialmente aquellos propios del país que sean únicos, escasos o representativos, con el objeto de asegurar su permanencia y su capacidad de regeneración.

c) Contaminación: la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente.

d) Contaminante: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

e) Daño Ambiental: toda pérdida, disminución, detrimento o menoscabo significativo inferido al medio ambiente o a uno o más de sus componentes.

g) Desarrollo Sustentable: el proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida de las personas, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras.

k) Impacto Ambiental: la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

ll) Medio Ambiente: el sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural y que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones.

p) Preservación de la Naturaleza: el conjunto de políticas, planes, programas, normas y acciones, destinadas a asegurar la mantención de las condiciones que hacen posible la evolución y el desarrollo de las especies y de los ecosistemas del país.

q) Protección del Medio Ambiente: el conjunto de políticas, planes, programas, normas y acciones destinados a mejorar el medio ambiente y a prevenir y controlar su deterioro.

r) Recursos Naturales: los componentes del medio ambiente susceptibles de ser utilizados por el ser humano para la satisfacción de sus necesidades o intereses espirituales, culturales, sociales y económicos.

s) Reparación: la acción de reponer el medio ambiente o uno o más de sus componentes a una calidad similar a la que tenían con anterioridad al daño causado o, en caso de no ser ello posible, restablecer sus propiedades básicas.

Artículo 3°. - Sin perjuicio de las sanciones que señale la ley, todo el que culposa o dolosamente cause daño al medio ambiente, estará obligado a repararlo materialmente, a su costo, si ello fuere posible, e indemnizarlo en conformidad a la ley.

2.1.2. TITULO III De la Responsabilidad por Daño Ambiental

2.1.2.1. Párrafo 1° Del Daño Ambiental

Artículo 51.- Todo el que culposa o dolosamente cause daño ambiental responderá del mismo en conformidad a la presente ley. No obstante, las normas sobre responsabilidad por daño al medio ambiente contenidas en leyes especiales prevalecerán sobre las de la presente ley. Sin perjuicio de lo anterior, en lo no previsto por esta ley o por leyes especiales, se aplicarán las disposiciones del Título XXXV del Libro IV del Código Civil.

2.1.3. TITULO V Del Fondo de Protección Ambiental

Artículo 66.- El Ministerio del Medio Ambiente tendrá a su cargo la administración de un Fondo de Protección Ambiental, cuyo objeto será financiar total o parcialmente proyectos o actividades orientados a la protección o reparación del medio ambiente, el desarrollo sustentable, la preservación de la naturaleza o la conservación del patrimonio ambiental.

2.2. LEY 21.100 MMA

- Denominación: Prohíbe la entrega de bolsas plásticas de comercio en todo el territorio nacional (fragmento).

Fecha de promulgación : Julio 20, año 2018.

Fecha de publicación : Agosto 3, año 2018.

Organismo : Ministerio del Medio Ambiente.

Artículo 1.- Objeto. La presente ley tiene por objeto proteger el medio ambiente mediante la prohibición de entrega de bolsas plásticas de comercio.

Artículo 2.- Definiciones. Para los efectos de esta ley se entenderá por:

a) Bolsa: Embalaje flexible constituido de un cuerpo tubular cerrado en uno de sus extremos.

b) Bolsa plástica: Bolsa que contiene como componente fundamental un polímero que se produce a partir del petróleo.

c) Bolsa plástica de comercio: Bolsa plástica que es entregada por un establecimiento de comercio para el transporte de mercaderías o, en el caso de compras realizadas por medios electrónicos, bolsa para el transporte de mercaderías que es entregada al consumidor final.

d) Establecimiento de comercio: Cualquier canal minorista o mayorista de distribución o comercialización de bienes o servicios.

Artículo 3.- Prohibición. Prohíbese a los establecimientos de comercio la entrega, a cualquier título, de bolsas plásticas de comercio. Se excluyen de esta prohibición las bolsas que constituyan el envase primario de alimentos, que sea necesario por razones higiénicas o porque su uso ayude a prevenir el desperdicio de alimentos.

2.3. **LEY 20.920 MMA**

- Denominación: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje (fragmento).
 Fecha de promulgación : Mayo 17, año 2016.
 Fecha de publicación : Junio 1, año 2016.
 Organismo : Ministerio del Medio Ambiente.

2.3.1. **TÍTULO I Disposiciones Generales**

Artículo 1º.- Objeto. La presente ley tiene por objeto disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente.

Artículo 2º.- Principios. Los principios que inspiran la presente ley son los siguientes:

b) Gradualismo: Las obligaciones para prevenir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización serán establecidas o exigidas de manera progresiva, atendiendo a la cantidad y peligrosidad de los residuos, las tecnologías disponibles, el impacto económico y social y la situación geográfica, entre otros.

c) Inclusión: Conjunto de mecanismos e instrumentos de capacitación, financiación y formalización orientados a posibilitar la integración plena de los recicladores de base en la gestión de los residuos, incluidos los sistemas de gestión en el marco de la responsabilidad extendida del productor.

i) Responsabilidad del generador de un residuo: El generador de un residuo es responsable de éste, desde su generación hasta su valorización o eliminación, en conformidad a la ley.

Artículo 3º.- Definiciones. Para los efectos de esta ley, se entenderá por:

2) Ciclo de vida de un producto: Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema productivo, desde la adquisición de materias primas o su generación a partir de recursos naturales, hasta su eliminación como residuo.

7) Ecodiseño: Integración de aspectos ambientales en el diseño del producto, envase, embalaje, etiquetado u otros, con el fin de disminuir las externalidades ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida.

8) Eliminación: Todo procedimiento cuyo objetivo es disponer en forma definitiva o destruir un residuo en instalaciones autorizadas.

9) Generador: Poseedor de un producto, sustancia u objeto que lo desecha o tiene la obligación de desecharlo de acuerdo a la normativa vigente.

10) Gestor: Persona natural o jurídica, pública o privada, que realiza cualquiera de las operaciones de manejo de residuos y que se encuentra autorizada y registrada en conformidad a la normativa vigente.

11) Gestión: Operaciones de manejo y otras acciones de política, de planificación, normativas, administrativas, financieras, organizativas, educativas, de evaluación, de seguimiento y fiscalización, referidas a residuos.

14) Manejo ambientalmente racional: La adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los residuos se manejen de manera que el medio ambiente y la salud de las personas queden protegidos contra los efectos perjudiciales que pueden derivarse de tales residuos.

15) Mejores prácticas ambientales: La aplicación de la combinación más exigente y pertinente de medidas y estrategias de control ambiental.

16) Mejores técnicas disponibles: La etapa más eficaz y avanzada en el desarrollo de los procesos, instalaciones o métodos de operación, que expresan la pertinencia técnica, social y económica de una medida particular para limitar los impactos negativos en el medio ambiente y la salud de las personas.

19) Pretratamiento: Operaciones físicas preparatorias o previas a la valorización o eliminación, tales como separación, desembalaje, corte, trituración, compactación,

mezclado, lavado y empaque, entre otros, destinadas a reducir su volumen, facilitar su manipulación o potenciar su valorización.

23) Reciclaje: Empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, incluyendo el coprocesamiento y compostaje, pero excluyendo la valorización energética.

24) Recolección: Operación consistente en recoger residuos, incluido su almacenamiento inicial, con el objeto de transportarlos a una instalación de almacenamiento, una instalación de valorización o de eliminación, según corresponda. La recolección de residuos separados en origen se denomina diferenciada o selectiva.

25) Residuo: Sustancia u objeto que su generador desecha o tiene la intención u obligación de desechar de acuerdo a la normativa vigente.

29) Tratamiento: Operaciones de valorización y eliminación de residuos.

30) Valorización: Conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y, o el poder calorífico de los mismos. La valorización comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética.

31) Valorización energética: Empleo de un residuo con la finalidad de aprovechar su poder calorífico.

Artículo 6º.- Obligaciones de los gestores de residuos. Todo gestor deberá manejar los residuos de manera ambientalmente racional, aplicando las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, en conformidad a la normativa vigente, y contar con la o las autorizaciones correspondientes. Asimismo, todo gestor deberá declarar, a través del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, al menos, el tipo, cantidad, costos, tarifa del servicio, origen, tratamiento y destino de los residuos, de acuerdo a lo dispuesto en el reglamento a que se refiere el artículo 70, letra p), de la ley N° 19.300.

2.4. DECRETO SUPREMO 148 MINSAL

- Denominación: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (fragmento).
 Fecha de promulgación : Junio 12, año 2003.
 Fecha de publicación : Junio 16, año 2004.
 Organismo : Ministerio de Salud.

2.4.1. TITULO I Disposiciones Generales

Artículo 1.- Este Reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reuso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

Artículo 3.- Para los efectos del presente reglamento, las expresiones que aquí se indican tendrán el significado que se señala:

- Almacenamiento o acumulación: se refiere a la conservación de residuos en un sitio y por un lapso determinados.
- Destinatario: propietario, administrador o persona responsable de una instalación expresamente autorizada para eliminar residuos peligrosos generados fuera de ella.
- Disposición final: procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo en el suelo de los residuos peligrosos, con o sin tratamiento previo.
- Incineración: destrucción mediante combustión o quema técnicamente controlada de las sustancias orgánicas contenidas en un residuo.
- Instalación de Eliminación: planta o estructura destinada a la eliminación de residuos peligrosos.
- Manejo: todas las operaciones a las que se somete un residuo peligroso luego de su generación, incluyendo, entre otras, su almacenamiento, transporte y eliminación.
- Residuo o desecho: sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.
- Tratamiento: todo proceso destinado a cambiar las características físicas y/ o químicas de los residuos peligrosos, con el objetivo de neutralizarlos, recuperar energía o materiales o eliminar o disminuir su peligrosidad.

2.4.2. Párrafo I De las Instalaciones de Eliminación

Artículo 43.- Toda Instalación de Eliminación de Residuos Peligrosos deberá contar con la respectiva autorización otorgada por la Autoridad Sanitaria, en la que se especificará el tipo de residuos que podrá eliminar y la forma en que dicha eliminación será llevada a cabo ya sea mediante tratamiento, reciclaje y/o disposición final. Al momento de otorgar dicha autorización se asignará un número de identificación, válido para la aplicación del Título VII de este Reglamento.

Artículo 50.- La operación de toda Instalación de Eliminación de Residuos Peligrosos deberá cumplir con las siguientes exigencias:

a) La recepción de los residuos solo podrá hacerse cuando se asegure que los residuos pueden ser manejados en la Instalación. Para estos efectos, la Instalación deberá realizar análisis físico-químicos de los residuos conforme a un Manual de Procedimientos que especifique por lo menos los parámetros que se deberán analizar para cada residuo peligroso y métodos y frecuencia de análisis.

b) Mantener un registro de los residuos ingresados, en el que se deberá consignar al menos la cantidad, la fecha de ingreso, las características de peligrosidad del residuo, la ubicación del sitio de almacenamiento y la fecha e identificación de la operación de eliminación aplicada.

c) En el caso de que la Instalación rechace un cargamento de residuos peligrosos, ya sea porque el transportista no porte el Documento de Declaración o porque la información contenida en dicho documento no se corresponde con los residuos transportados o por cualquier otra causa, se deberá dar aviso inmediato a la Autoridad Sanitaria respectiva.

2.4.3. Párrafo IV De la Incineración

Artículo 71.- Estas Instalaciones serán diseñadas y equipadas de modo de garantizar que la temperatura de los gases derivados de la incineración se eleve, tras la última inyección de aire de combustión, de manera controlada y homogénea e incluso en las condiciones más desfavorables, hasta por lo menos 850 °C, alcanzados en o cerca de la pared interna de la cámara de combustión, como mínimo durante 2 segundos, con un mínimo de 11% de oxígeno en el caso de residuos sólidos y de 3% en el caso de residuos líquidos y gaseosos. En el caso de la incineración de residuos peligrosos que contengan más del 1 % de cloro, expresado como porcentaje en masa, la temperatura deberá elevarse hasta por lo menos 1.100 °C.

Artículo 72.- Las Instalaciones de Incineración estarán equipadas con quemadores que se pongan en marcha automáticamente cuando la temperatura de los gases de combustión, tras la última inyección de aire, descienda por debajo de las temperaturas mínimas señaladas en el artículo 71. Asimismo, se utilizarán dichos quemadores durante la operación de puesta en marcha y de detención de la instalación a fin de asegurarse que esas temperaturas se mantienen mientras haya residuos no incinerados en la cámara de combustión. Durante la puesta en marcha o la parada, o cuando la temperatura de los gases de combustión descienda por debajo de las temperaturas mínimas señaladas, los quemadores no podrán alimentarse con residuos

combustibles que puedan causar emisiones mayores que las producidas por la quema del combustible auxiliar utilizado en la instalación.

Artículo 74.- El diseño de una Instalación de Incineración deberá contemplar una chimenea y los demás equipos que sean necesarios para asegurar que las emisiones a nivel del suelo no provoquen una contaminación que ponga en riesgo la salud.

Artículo 75.- En caso de que las mediciones efectuadas indiquen que se ha sobrepasado lo establecido en una norma primaria de emisión, se informará de inmediato a la Autoridad Sanitaria las causas del incumplimiento y las medidas correctivas para superarlas.

2.5. **DECRETO SUPREMO 29 MMA**

- Denominación: Establece norma de emisión para incineración, consideración y procesamiento y deroga decreto N° 45, de 2007, del ministerio secretaría general de la presidencia Reglamento de calderas, autoclaves y equipos que utilizan vapor de agua (fragmento).

Fecha de promulgación : Julio 30, año 2013.

Fecha de publicación : Septiembre 12, año 2013.

Organismo : Ministerio del Medio Ambiente.

2.5.1. **TÍTULO PRIMERO Disposiciones Generales**

Artículo 1º.- Establécese, para todo el territorio nacional, la norma de emisión para las instalaciones de incineración, las instalaciones de coincineración que correspondan a hornos rotatorios de cal o a instalaciones forestales y para las instalaciones de coprocesamiento que correspondan a hornos de cemento, que utilicen combustibles distintos a los tradicionales.

Su objetivo es prevenir los efectos negativos sobre la salud de la población y los recursos naturales, derivados de las emisiones tóxicas provenientes de los procesos de incineración, coprocesamiento y coincineración regulados por este decreto.

No estarán afectos a esta norma de emisión:

a) La incineración de gases TRS (del inglés Total Reduced Sulphur), asociados a la fabricación de pulpa sulfatada, contaminantes regulados por el DS N° 37, de 2012,

del Ministerio del Medio Ambiente, el uso como combustible del licor negro y sus derivados y de los lodos generados en el tratamiento primario y/o secundario de efluentes, en instalaciones forestales.

b) La incineración en crematorios, exclusivamente de cadáveres humanos.

c) La incineración de productos cuarentenarios o con potencial de estar contaminados con agentes cuarentenarios.

d) La quema de drogas decomisadas.

2.5.2. TÍTULO TERCERO Condiciones de operación

Artículo 8º.- Asimismo, las instalaciones de incineración, coprocesamiento o coincineración reguladas por este decreto y que procesen sustancias o materiales que contengan cloro, deberán reducir al mínimo técnicamente posible el tiempo de enfriamiento de los gases de emisión desde los 400°C hasta los 200°C.

CAPÍTULO 3: TRATAMIENTO DE RESIDUOS

3. TRATAMIENTO DE RESIDUOS

En el desarrollo de este capítulo, se aborda una propuesta de solución y los aspectos vinculados a esta. El tratamiento de residuos propuesto, corresponde a la incineración; problemas propios de esta práctica, sustancias producidas, mecanismos de formación, equipos afines, entre otros.

3.1. DEFINICIONES

Lo primero corresponde a entregar definiciones, las cuales son necesarias para comprender el tema tratado. Las sustancias llamadas dioxinas y furanos, están vinculados a diversos grupos y/o categorías, que son presentados a continuación.

3.1.1. Compuestos Orgánicos Persistentes

Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs), son compuestos químicos tóxicos, que se resisten a la degradación química, fotoquímica y bioquímica. Debido a esto, su vida media es elevada en el medio ambiente. Aunque el origen de estos compuestos puede ser natural, como en el caso de incendios forestales y erupciones volcánicas, la mayoría de ellos son xenobióticos, es decir, que no se producen de manera natural o se espera que no estén presentes dentro de los organismos. Algunos COPs como las dioxinas “representan un grupo de compuestos químicos que raramente se dan espontáneamente en la naturaleza, exceptuando las que resultan de incendios de campos, maleza y bosques” (Pérez, et al., 2001, p. 66).

Los plaguicidas, los policlorobifenilos (PCBs), furanos y las ya mencionadas dioxinas, son parte de la familia de los Compuestos Orgánicos Persistentes.

3.1.2. Elementos halógenos

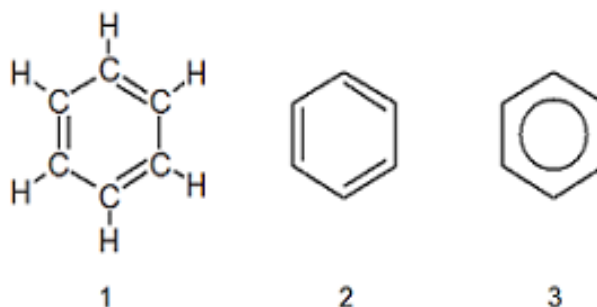
Son un grupo de elementos que se encuentran ubicados en grupo 17 de la tabla periódica. El grupo se encuentra formado por los elementos flúor, cloro, bromo, yodo y astato. También son conocidos como formadores de sales.

3.1.3. Compuestos orgánicos halogenados

Son sustancias químicas orgánicas que contienen uno o varios átomos de un elemento halógeno. Pueden ser sustancias simples y volátiles como es el caso del triclorometano (cloroformo), o moléculas orgánicas complejas como las dioxinas, que pueden presentar una amplia variedad de propiedades.

3.1.4. Compuestos aromáticos

El nombre “aromático” proviene del descubrimiento en el siglo XIX, de sustancias como resinas y esencias de las que emanaban aromas intensos. Estas sustancias tenían en común dentro de su composición los anillos de benceno, en el cual se presentan tres enlaces dobles y tres enlaces simples. Son hidrocarburos, el exponente principal de este grupo de sustancias es el benceno (C_6H_6), como se aprecia en la figura 3-1. La configuración aromática de seis átomos de carbono, se denomina núcleo de benceno. Los hidrocarburos aromáticos, dependiendo del número de núcleos bencénicos, pueden ser monocíclicos o policíclicos. Por ejemplo, el naftaleno ($C_{10}H_8$), producto de la fusión de dos anillos de benceno.



Fuente: <https://www.quimicas.net/2015/05/ejemplos-de-hidrocarburos-aromaticos.html>.

Figura 3-1. El benceno (C_6H_6)

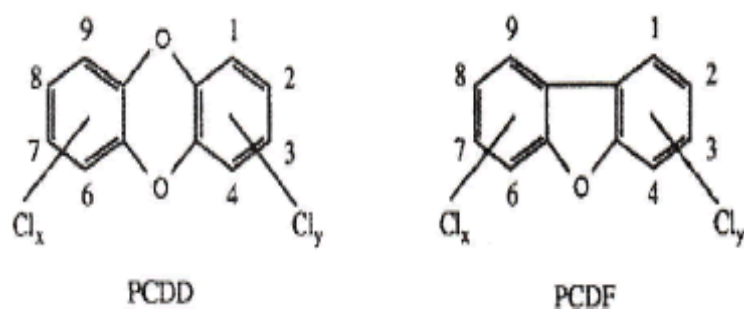
Llamado también anillo de benceno, es un hidrocarburo aromático. Existen distintas formas de representarlo, como en los casos 1, 2 y 3.

3.2. DIOXINAS Y FURANOS

Las dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD) y los dibenzofuranos policlorados (PCDF), comúnmente llamados dioxinas y furanos, son compuestos organoclorados que también entran en las categorías de compuestos orgánicos persistentes, compuestos aromáticos y compuestos halogenados; con características como:

- Alta toxicidad.
- Liposolubilidad.
- Carcinógenos o cancerígenos.
- Mutagénicos.
- Estables químicamente.
- Estables térmicamente.
- Resistentes a la degradación.
- Persistentes en el tiempo.
- Capacidad herbicida, pesticida, defoliante, entre otras.

Corresponden a dos clases de compuestos que tienen propiedades similares. El cloro se une a los anillos de benceno, produciéndose la formación de una amplia cantidad de sustancias congéneres; 75 para dioxinas y 135 para furanos. “Una dibenzodioxina policlorinada consta de dos anillos de benceno unidos por medio de dos átomos de oxígeno. Un dibenzofurano policlorinado es similar, pero solamente tiene un átomo de oxígeno” (Pérez, et al., 2001, p. 66). Las estructuras químicas genéricas de estos, se muestran en la figura 3-2.



Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372005000100007&script=sci_arttext&tlng=en.

Figura 3-2. Estructura química general de dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF).

De entre estos compuestos, el 2, 3, 7, 8 tetracloro-dibenzo-*p*-dioxina es el más peligroso, es comúnmente reconocido con el nombre de TCDD. El grado de toxicidad de los otros congéneres es en referencia a este, empleando los factores de equivalencia tóxica. Los congéneres corresponden a sustancias químicas relacionadas entre sí por su origen, estructura o función; es el “nombre de un compuesto dado que pertenece a una clase de sustancia química. En este caso, cualquier compuesto con 1 a 8 átomos de cloro, perteneciente a la clase de dioxinas o furanos, corresponde a un congenero” (Assunção & Pesquero, 1999).

3.2.1. Fuentes de polución

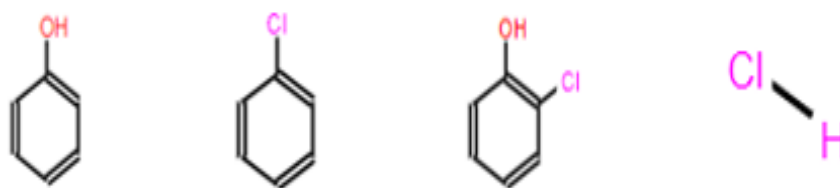
Si bien estas sustancias pueden producirse de forma natural, son principalmente causadas por la acción del ser humano:

- Incineración de basura y otros residuos sólidos.
- Combustión de carbón, madera, petróleo y derivados (polímeros petroquímicos).
- Quema de neumáticos usados.
- Industria química, producción de cloro y derivados clorados orgánicos, producción de insecticidas, herbicidas, etc.
- Plantas cementeras.
- Producción de papel, blanqueado con cloro.
- Industria textil.
- Otros.
- Generación de estas sustancias de manera natural:
- Erupciones volcánicas.
- Incendios forestales.
- Otros.

3.2.2. Mecanismos de formación

Según estudios realizados en sistemas de incineración, existen ciertos mecanismos de formación para dioxinas y furanos. “A partir de los distintos estudios realizados tanto de incineradoras de residuos urbanos como de estudios de laboratorio, se pueden considerar 4 grandes vías de formación de PCDDs/Fs en procesos de combustión” (Moltó, 2007, p. 51). Estas vías son de carácter teórico y están relacionadas a la formación de las sustancias tóxicas mencionada, en procesos de incineración. Pueden ocurrir de manera simultánea entre algunas o incluso todas a la vez. Los mecanismos propuestos son:

1. Las dioxinas y furanos se encuentran presentes en los materiales que se incineran. Gracias a las adecuadas condiciones en el proceso de combustión, esta opción es poco probable. Considerando que “los niveles de dioxinas en los gases de salida pueden reducirse hasta un 0.001 % de la concentración presente en los residuos incinerados” (Moltó, 2007, p. 51). Al incinerar los residuos se producen cenizas. En estas, los niveles de dioxinas y furanos (cenizas volantes y cenizas en el fondo) pueden ser mayores a los niveles propios presentes en los residuos, solo si el proceso de combustión no ha sido adecuado. Ya que las cenizas en el fondo podrían almacenar parte de las dioxinas del material de entrada.
2. Conformación en fase gaseosa mediante precursores. Las sustancias tóxicas (PCDD y PCDF) se generan por ruptura térmica, la cual se produce entre 500 y 800 °C. Con la posterior reconfiguración de los compuestos precursores, como son los hidrocarburos aromáticos clorados. “Los compuestos precursores son hidrocarburos aromáticos clorados que tienen similitud estructural con las moléculas de CDD/Fs. Entre los precursores identificados están: los aromáticos monocíclicos (con o sin grupos funcionales) y los aromáticos clorados como los bencenos clorados” (Pérez, et al., 2001, p. 70). Además, Moltó (2007) establece que “la reacción general que podría tener lugar sería una interacción entre compuestos aromáticos con estructura fenólica y alguna especie química que pueda actuar como donante de cloro (HCl, PVC)” (p. 51). Compuestos como bencenos clorados y fenoles clorados, que se muestran en la figura 3-3, son considerados como buenos precursores para estas reacciones.



Fuente: Elaboración propia mediante el uso de aplicación JSME Molecular Editor.

Figura 3-3. Fenol, clorobenceno, clorofenol y cloruro de hidrógeno de izquierda a derecha respectivamente.

3. Precursores por formación catalítica. Las sustancias tóxicas se forman por ruptura térmica y reconfiguración de compuestos precursores del tipo aromático; los cuales son “adsorbidos sobre partículas catalíticas depositas en las cenizas volantes y/o en las paredes de los conductos, después de la cámara secundaria y

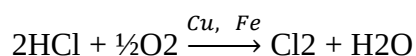
a temperaturas entre 200 y 400 °C” (Moltó, 2007, p. 51-52). Respecto de las cenizas volantes, si en estas se halla cloruro de cobre (CuCl_2), ocurre un favorecimiento en las reacciones. El cloruro de cobre, se usa en la producción de textiles, la metalurgia, productos agrícolas, como catalizador en reacciones de polimerización del cloruro de vinilo y en la fabricación de acrilonitrilo, estos dos últimos, corresponden a polímeros muy usados en la actualidad.

4. Síntesis a partir “De Novo”. Según esta vía de formación, las dioxinas y furanos pueden sintetizarse a causa de sustancias que no están relacionadas a la estructura de estas, por ejemplo, el hollín. El cual “es un producto final resultado de las reacciones pirolíticas que sufre la materia carbonosa, constituido por 97-99% de C y 1-3% de H y que forma parte de las cenizas volantes, pudiendo adsorber sobre su superficie a otros compuestos” (Aracil, 2008, p. 63). El enfriamiento de los gases en el sistema posterior a la zona de combustión, da lugar a la formación de dioxinas y furanos por esta vía. Esto, debido a temperaturas acotadas entre 300 y 500 °C; lo que favorece dicha formación. En este mecanismo se presentan 3 etapas:

- 4.1. Adsorción sobre la estructura metálica o la estructura de carbono, oxidación posterior causada por la presencia de oxígeno.
- 4.2. La oxidación del carbono puede producir compuestos aromáticos monocíclicos como el benceno, o policíclicos como el naftaleno, los cuales al entrar en contacto con un catalizador en fase sólida, pueden dar lugar a las estructuras de las dioxinas y furanos (figura 3-2) sin clorar, es decir, el cloro como sustituyente aún no se enlaza a la estructura.
- 4.3. En esta etapa de halogenación o deshalogenación, intervienen los elementos halógenos, vistos con anterioridad en el título 3.2. Esta interacción puede darse con anterioridad o posterioridad a la formación de la estructura de dioxinas y furanos (etapa anterior), debido a la sustitución del hidrógeno por parte del cloro. Además, “se ha descubierto que el cobre es uno de los catalizadores más activos para la halogenación de compuestos aromáticos.” (Moltó, 2007, p. 52).

Teniendo en cuenta que algunos elementos pueden ingresar al sistema, en la misma química de los residuos plásticos, como cloro (del policloruro de vinilo), hidrógeno, carbono, etc., se presenta la siguiente situación; tanto el cloruro de hidrógeno (HCl) como el dicloro (Cl_2), pueden interactuar en el proceso de formación de sustancias tóxicas. Debido a las temperaturas del proceso de incineración, cabe destacar que el cloruro de hidrógeno puede hallarse a altas temperaturas, aunque su capacidad para clorar sea inferior a la capacidad del dicloro. “La formación de Cl_2 tiene lugar, en presencia de oxígeno y catalizada mediante cobre o hierro, en la superficie de las cenizas volantes

mediante el proceso Deacon” (Moltó, 2007, p. 52). Se denomina Proceso de Deacon a la obtención de Cl₂, mediante la oxidación de HCl usando catalizadores (Cu, CuCl₂, Cu₂O, Fe, entre otros), la reacción tiene lugar, principalmente, en el rango de temperaturas de 150 °C a 450 °C.



Formación de Cl₂ mediante oxidación de cloruro de hidrógeno, utilizando cobre como catalizador. (Fuente: Moltó, 2007, p. 52.)

3.2.3. Atenuación y control

A continuación, se abordan aspectos específicos con el objetivo de evitar o atenuar en gran medida, la síntesis de sustancias tóxicas y controlar sus emisiones en el proceso de incineración.

3.2.3.1. Aspectos de la formación

Luego de los mecanismos de formación, vistos con anterioridad, deben analizarse los aspectos involucrados en dicha formación, con el fin de evitar aquellos que sean facilitadores. Algunos autores señalan que:

las condiciones de operación en los procesos de incineración que influyen en la formación de las PCDD/Fs son: la temperatura y el porcentaje de exceso de oxígeno en las cámaras de combustión, la forma de alimentación del desecho, las condiciones de enfriamiento y la limpieza de los gases de combustión.

A menos que ocurran grandes fluctuaciones de temperatura en el horno, los bajos niveles de temperatura que favorecen la formación de dioxinas se presentan en las regiones posteriores a las cámaras de combustión; más concretamente en la zona de enfriamiento y limpieza de los gases de salida. Por esta razón es que se hace tan importante enfriar y limpiar los gases de combustión tan rápido como sea posible. La alimentación del desecho al horno es preferible hacerla en forma continua. Esto reduce la cantidad de cenizas en suspensión y las fluctuaciones en la temperatura de combustión. (Pérez, et al., 2001, p. 71).

El oxígeno presente en las zonas posteriores a la incineración tiene efectos importantes, si dicha “incineración se lleva a cabo bajo condiciones de escasez de oxígeno, existe el peligro de que algunos de los compuestos orgánicos halogenados sean

oxidados parcialmente” (Pérez, et al., 2001, p. 71), lo cual debe ser evitado debido a la participación de estos compuestos en la formación de dioxinas y furanos (visto en el título 3.2.2.). Luego, se da otra situación negativa en la que “un incremento en la concentración de O₂ resulta en una concentración más alta de Cl₂ (reacción de Deacon)” (Pérez, et al., 2001, p. 71); debido a la oxidación del HCL. Por estas causas, se debe controlar la cantidad de O₂ al interior del sistema.

3.2.3.2. Cámaras de incineración

Antes de describir las medidas de control aplicables en la postcombustión, es importante comprender de lo que trata, en seguida se entrega una breve descripción.

En una instalación de incineración existe en general, una zona primaria de combustión (cámara) y una secundaria. En esta última se realiza una segunda combustión. La temperatura de la cámara primaria se mantiene debajo del punto de fusión de la mayoría de los metales, vidrios y otros materiales no combustibles, dejando por lo tanto estos elementos para descargarse junto con las cenizas residuales. Respecto a la cámara primaria, en la que se cargan los residuos, que trabaja a una temperatura sobre los 800 °C y cámara de postcombustión, a una temperatura más alta de alrededor de 1.100 °C, en la que se queman los humos provenientes de la cámara principal.

Es importante que se genere una temperatura superior a los 800 °C en cámara primaria del incinerador, para evitar la generación de dioxinas y furanos; “como ocurre en la incineración de residuos donde la temperatura en general es cercana o superior a 900 °C y el tiempo de residencia es alto (1 a 2 segundos)” (Assunção & Pesquero, 1999, p. 525). Luego, “las cámaras de postcombustión completan el proceso manteniendo temperaturas del orden de los 1200 °C” (Pérez, et al., 2001, p. 72). De esta forma se espera quemar el carbono y disociar sustancias que lo contengan en su estructura, como son los compuestos aromáticos; presentes en los gases generados en la cámara primaria de incineración.

Otro punto a tener en cuenta, corresponde al tiempo de residencia de los gases de la combustión. Estos, deben permanecer “de 2 a 4 segundos como mínimo lo cual, combinado con las temperaturas alcanzadas en la cámara, debe ser suficiente para lograr altas eficiencias de combustión” (Pérez, et al., 2001, p. 72). Destruyendo las PCDDs, PCDFs u otros compuestos orgánicos, que pudiesen formarse.

3.2.3.3. Importancia del enfriamiento de los gases de salida

Según los mecanismos de formación de dioxinas y furanos, hay que prestar atención a los gases que salen de la zona de incineración (combustión y postcombustión).

Cuando estos gases se enfrían, es posible la formación o reformación de compuestos tóxicos debido a que la temperatura de estos va disminuyendo a medida que circula a través del sistema y se aleja de las cámaras de combustión. Además de la presencia de cenizas, las cuales también son parte de los mecanismos de formación.

Luego de la zona de combustión, si los gases de salida se enfrían, desde el rango de temperaturas de 800 °C a 1.100 °C hasta la temperatura ambiente, existe el peligro de regeneración de compuestos tóxicos. Debido a estas causas, se requiere enfriar los gases de salida rápidamente, “las altas velocidades de enfriamiento conllevan emisiones más bajas de PCDD/Fs, y deben ser al menos de 300°C/s (preferiblemente superiores a 1.000°C/s) al pasar por el intervalo de 200 a 500°C” (Pérez, et al., 2001, p. 72).

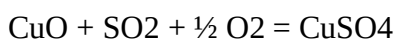
3.2.3.4. Inhibición de compuestos tóxicos

El uso de la urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), puede ayudar a la disminución en la formación de dioxinas y furanos, mediante la adicción de esta, a las cenizas o inyectándola como solución acuosa en la zona de postcombustión. “La adición de la urea en el combustible antes de la combustión resulta en una directa disminución de las emisiones de las PCDD/Fs” (Pérez, et al., 2001, p. 73).

Sustancias como el óxido de calcio (CaO), el amoníaco (NH_3) y otras de carácter alcalino, ayudan a la disminución de dioxinas y furanos, mediante la prevención de su formación. Esto, debido a que previenen la segregación del HCl (el cual cede cloro en el Proceso de Deacon).

Utilizar agua también puede ayudar a la disminución de sustancias tóxicas. Al inyectar agua, esta actúa como material de absorción, además de disminuir la temperatura de los gases de salida de la zona de combustión.

Otra forma para atenuar la generación de compuestos peligrosos para la salud y el medio ambiente, es el uso de inhibidores químicos. Estos cumplen la tarea de vincularse a las cenizas presentes formando compuestos estables, de modo tal que reducen la acción catalítica de ciertas sustancias. Ya que esta acción no destruye los PCDDs ni los PCDFs sino que, previene su formación, aquellos inhibidores seleccionados para el uso deben ser administrados justo después de la incineración. “Sirven como inhibidores el dióxido de azufre (SO_2), el amoníaco (NH_3) y las aminas” (Pérez, et al., 2001, p. 73). Usando de SO_2 como posible inhibidor, se obtiene:



Se utilizó SO_2 para neutralizar compuestos catalíticos (CuO), en la formación de dioxinas y furanos. (Fuente: Pérez, et al., 2001, p. 73)

Además, el cloro que forma parte del HCl, tiene menor probabilidad de sufrir reacciones de sustitución:



Se utilizó SO₂ para evitar la presencia de Cl₂ libre. (Fuente: Pérez, et al., 2001, p. 73)

3.3. MATERIAL DE INGRESO

Los materiales de ingreso en el proceso de incineración, corresponden a desechos plásticos. Estos pueden ser aprovechados como combustibles debido a su gran poder calorífico. Este método es particularmente aplicable para este tipo de materiales, ya que presentan irregularidades, deterioro y suciedad debido al gran uso dado.

A continuación, se presentan los plásticos que pudieran ser procesados mediante combustión, describiendo las características más relevantes a este objetivo.

3.3.1. Características relevantes de los plásticos

Los materiales plásticos y por consecuencia los desechos más empleados, son aquellos con clasificación RIC (capítulo 1): 1, 2, 3, 4,5 y 6; “Suponen un 80% de los plásticos producidos actualmente” (Castells & de Gracia, 2012). En seguida se muestran algunas de sus características:

3.3.1.1. Tereftalato de Polietileno (PET)

Fórmula molecular	: (C ₁₀ H ₈ O ₄) _n
Punto de fusión	: 260 °C
Poder calorífico	: 5,1 Mcal/kg
Calor específico	: 1.200 J/K*kg
Densidad	: 1,3 - 1,4 g/cm ³

3.3.1.2. Polietileno de alta densidad (HDPE)

Fórmula molecular : (-CH₂-CH₂-)_n

Punto de fusión	: 130.8 °C
Poder calorífico	: 10 Mcal/kg
Calor específico	: 1.900 J/K*kg
Densidad	: 0,94 - 0,97 g/cm ³

3.3.1.3. Policloruro de vinilo (PVC)

Fórmula molecular	: (C ₂ H ₃ Cl) _n
Punto de fusión	: 100 - 260 °C
Poder calorífico	: 5,0 Mcal/kg
Calor específico	: 1.000 - 1.500 J/K*kg
Densidad	: 1,4 g/cm ³

3.3.1.4. Polietileno de baja densidad (LDPE)

Fórmula molecular	: (-CH ₂ -CH ₂ -) _n
Punto de fusión	: 98 - 115 °C.
Poder calorífico	: 10 Mcal/kg
Calor específico	: 1.900 - 2.300 J/K*kg
Densidad	: 0,92 - 0,93g/cm ³

3.3.1.5. Polipropileno (PP)

Fórmula molecular	: -(C ₃ H ₆)- _n
Punto de fusión	: 173 °C
Poder calorífico	: 11 Mcal/kg
Calor específico	: 1.700 - 1.900 J/K*kg
Densidad	: 0,9 g/cm ³

3.3.1.6. Poliestireno (PS)

Fórmula molecular	: (C ₈ H ₈) _n
Punto de fusión	: 240 °C.
Poder calorífico	: 9,5 Mcal/kg
Calor específico	: 1.200 J/K*kg
Densidad	: 1,05 g/cm ³

3.3.1.7. Otros plásticos y materiales compuestos

Debido a la gran variedad de materiales agregados a esta categoría (número 7) y teniendo en cuenta que los plásticos principalmente usados son los primeros 6, es que este punto no contiene datos.

3.4. **PROCESO DE INCINERACIÓN**

El proceso de incineración de desechos plásticos, será descrito a continuación, luego de una breve reseña internacional, la cual muestra ejemplos tangibles de la aplicación de esta medida.

3.4.1. Reseña internacional

A nivel internacional se han establecido organizaciones dedicadas al tratamiento de residuos, mediante la incineración de los mismos. En seguida, se presentan algunos ejemplos:

3.4.1.1. País: Alemania

El nombre de la organización es Steinmüller Babcock Environment. La planta incineradora de residuos RZR II Herten/Alemania (figura 3-4), produce corriente eléctrica y usa como combustible, residuos urbanos. Tiene una capacidad máxima de tratamiento de 2 x 17.4 (ton/h). Utiliza un sistema de parrilla (parrilla de movimiento hacia adelante).



Fuente: https://www.steinmueller-babcock.com/_Resources/Persistent/9c27ade86ad5565c2bd669978b5c635371f2b120/EfW_spanisch.pdf.

Figura 3-4. Planta incineradora en Alemania.

3.4.1.2. País: Dinamarca

Amager Bakke es una planta de energía en Amager (figura 3-5), Copenhague. Se estima el procesamiento de 400.000 (ton/año) de residuos sólidos urbanos, mediante incineración. Además de producir más agua limpia de la que utiliza.



Fuente: <https://www.faod.dk/amager-bakke-vinder-scandinavian-green-roof-award/>.

Figura 3-5. Planta incineradora en Dinamarca.

3.4.1.3. País: España

Planta incineradora con generación de energía en Palma de Mallorca, España (figura 3-6). La compañía encargada de esta planta corresponde a TSK, la cual realiza proyectos de ingeniería e infraestructura a nivel internacional.



Fuente: <http://www.grupotsk.com/proyectos/planta-incineradora-de-residuos-urbanos-con-generacion-de-energia>.

Figura 3-6. Planta incineradora en España.

3.4.1.4. País: Noruega

Planta incineradora de Klemetsrud, en Oslo (figura 3-7). Esta, convierte la basura en electricidad, así como en agua caliente para el sistema de calefacción en la ciudad. Respecto de las emisiones de CO₂, cuenta con un proyecto piloto sobre captura y almacenaje de CO₂.



Fuente: <https://www.pinterest.dk/pin/528539706250843617/>.

Figura 3-7. Planta incineradora en Noruega.

3.4.1.5. País: Suecia

El nombre de la organización es Tekniska Verken. Una planta de energía en Linköping (figura 3-8), al sur de Estocolmo. Utiliza como insumo basura y produce

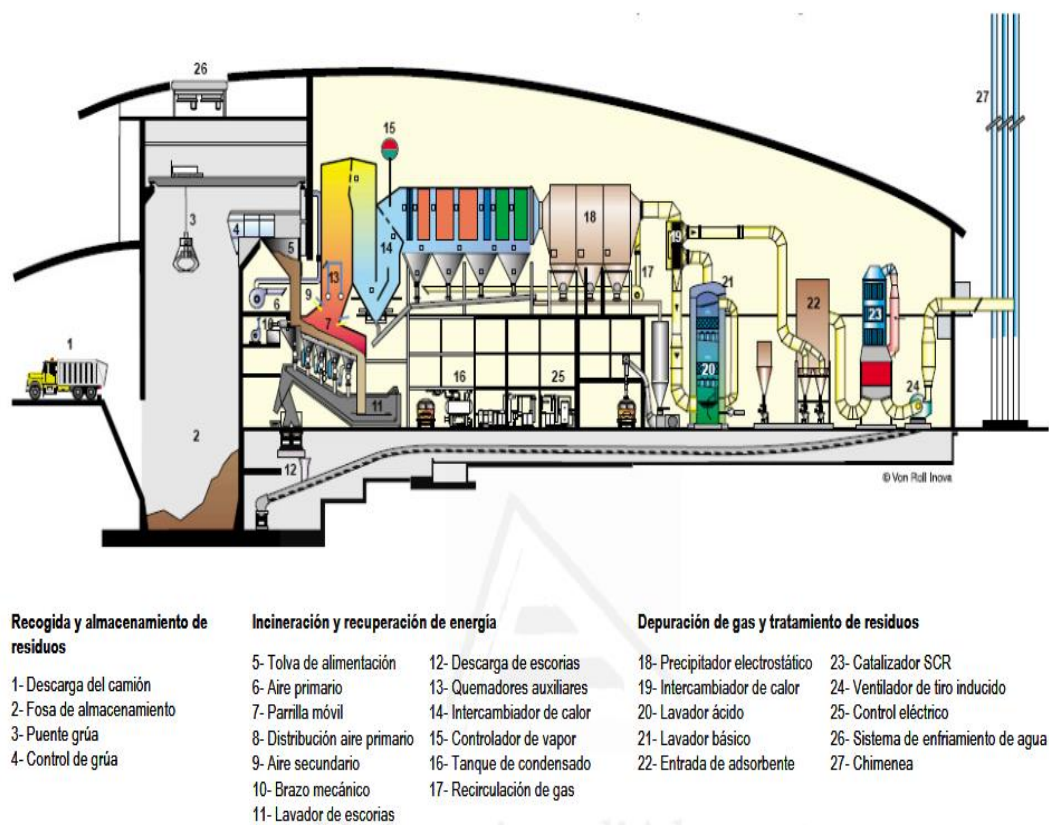
energía eléctrica. Su funcionamiento es de 24 horas e incinera los residuos a temperaturas de 1.500 °C.



Fuente: <https://www.bioeconomia.info/2018/10/03/la-basura-se-convierte-en-polemica-fuente-de-energia-para-suecia/>.

Figura 3-8. Planta incineradora en Suecia.

Cada planta de valoración de desechos tiene su propio diseño y características, según el tipo de desechos que traten, como RSU, plantas cementeras que utilizan caucho como combustible, etc. En general, las plantas incineradoras de desechos no peligrosos (que pueden contener plásticos, vidrio, textiles, madera papel, etc.) constan de elementos, etapas y subprocesos, como los presentados en la figura 3-9. “El diseño de una planta de incineración puede variar de unas instalaciones a otras, pero en general todas disponen de una serie de elementos comunes” (Aracil, 2008, p. 56).



Recogida y almacenamiento de residuos	Incineración y recuperación de energía		Depuración de gas y tratamiento de residuos	
1- Descarga del camión	5- Tolva de alimentación	12- Descarga de escorias	18- Precipitador electrostático	23- Catalizador SCR
2- Fosa de almacenamiento	6- Aire primario	13- Quemadores auxiliares	19- Intercambiador de calor	24- Ventilador de tiro inducido
3- Puente grúa	7- Parrilla móvil	14- Intercambiador de calor	20- Lavador ácido	25- Control eléctrico
4- Control de grúa	8- Distribución aire primario	15- Controlador de vapor	21- Lavador básico	26- Sistema de enfriamiento de agua
	9- Aire secundario	16- Tanque de condensado	22- Entrada de adsorbente	27- Chimenea
	10- Brazo mecánico	17- Recirculación de gas		
	11- Lavador de escorias			

Fuente: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf.

Figura 3-9. Diseño general de una planta incineradora.

3.4.2. Reseña nacional

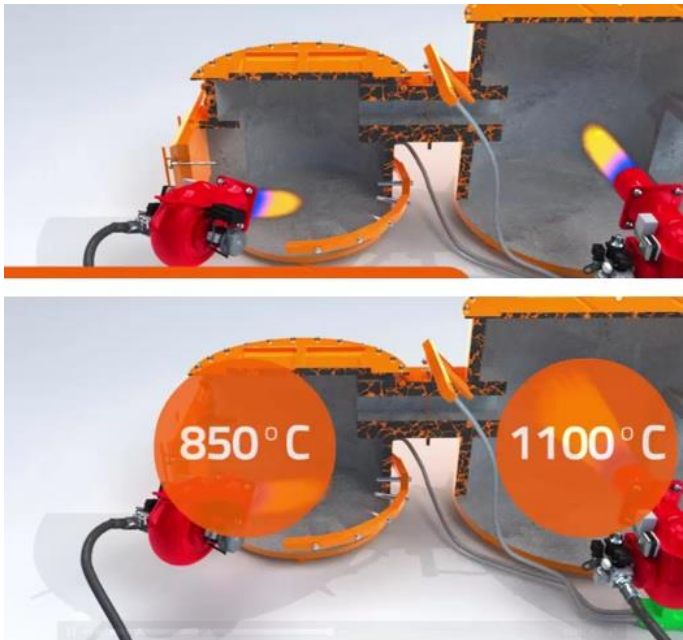
A nivel nacional, no se encontraron datos sobre plantas incineradoras de residuos ya establecidas, sin embargo, si se encontró información respecto de la intención de instalar plantas de este tipo en Chile. Como es el caso del proyecto WTE Araucanía, en la comuna de Lautaro (provincia de Cautín, región de la Araucanía), representada en la figura 3-10.



Fuente: <https://www.soychile.cl/Temuco/Sociedad/2018/10/02/559066/Alcalde-Becker-quiere-que-la-planta-incineradora-de-basura-se-ubique-en-Temuco.aspx>.

Figura 3-10. Diseño del proyecto WTE Araucanía.

Directamente relacionado al tema, existen empresas que ofrecen diseño y fabricación de hornos de incineración. Como es el caso de Hornos Industriales LTDA. Diseñados para el tratamiento de desperdicios de diversos tipos, como patológicos e industriales, orgánicos e inorgánicos. Para lo cual, sus sistemas cumplen con el DS 148. En la figura 3-11 se muestra un diseño de incinerador de doble cámara, el cual ofrece esta organización.



Fuente: http://www.hornosindustriales.cl/Menu/6_Multimedia/incinerador.htm.

Figura 3-11. Diseño de horno incinerador, empresa Hornos Industriales LTDA.

3.4.3. Descripción del proceso

Si bien el objeto de estudio en este trabajo corresponde a los materiales plásticos, en general, las plantas incineradoras de desechos constan de los siguientes sistemas:

3.4.3.1. Almacenamiento y equipos de alimentación

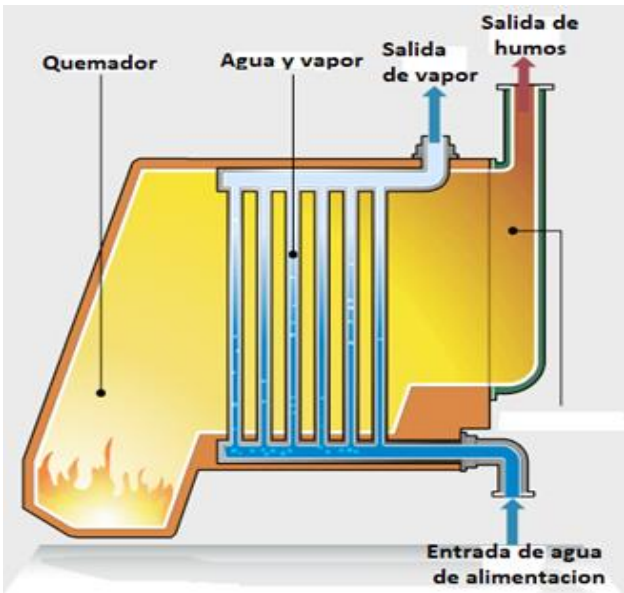
En gran parte de los casos, se usa un foso donde se depositan los residuos al llegar a la planta, con una grúa que alimenta al horno. Además, “en la primera fase, los desechos son conducidos sin tratamiento previo hasta una prensa que los compacta, distribuye sus residuos líquidos y les extrae el aire restante” (Wong, 2006, p. 24). Vinculado a esta etapa están los hornos incineradores. Si se pretende incinerar grandes volúmenes de desechos de manera continua, debe utilizarse entonces, un sistema de alimentación (por ejemplo, grúa recolectora) y un horno que cuente con parrilla móvil en su interior.

3.4.3.2. Combustión, postcombustión

Aquí se encuentra el horno que consta comúnmente de dos cámaras. En la cámara primaria se produce la combustión del residuo con defecto de oxígeno y los gases de combustión y productos volátiles resultantes de la primera etapa son alimentados a la cámara secundaria (postcombustión). Se utilizan además, alimentadores auxiliares de combustible para asegurar una temperatura elevada en todo el proceso.

3.4.3.3. Recuperación de energía

Para dicha recuperación, pueden emplearse calderas o equipos intercambiadores de calor; “el sistema de cogeneración consiste en un intercambiador de calor a través del cual circulan los gases de combustión calientes. De este modo se consigue obtener vapor de agua que puede alimentar una turbina” (Aracil, 2008, p. 59). Según se elija, puede utilizarse un sistema conformado por calderas (figura 3-12) o por intercambiadores de calor. En ambos casos el funcionamiento es similar, los gases calientes que provienen de la zona de combustión son dirigidos dentro de los equipos; en el interior se produce la transferencia de calor entre el flujo de gases y el flujo de líquidos (típicamente agua). Esta transferencia se da mediante convección y conducción. Produciéndose de este modo el incremento de la temperatura del agua y su cambio de estado a vapor, el cual se emplea para mover una o varias turbinas generadoras de corriente eléctrica.



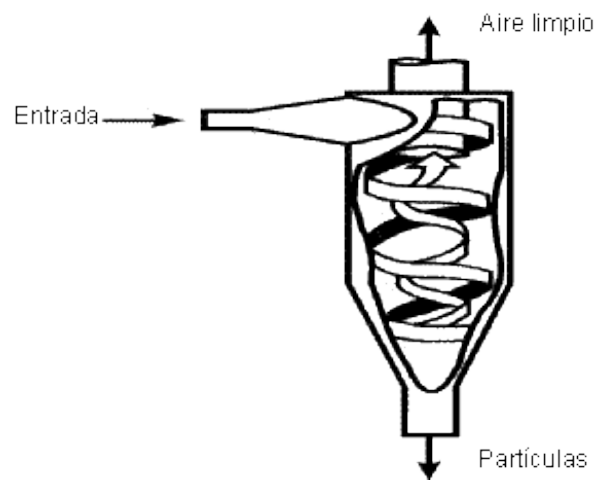
Fuente:

http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Calderas/preguntas_y_respuestas_sobre_calderas.html.

Figura 3-12. Ejemplo del funcionamiento de una caldera acuotubular.

3.4.3.4. Depuración de los gases de salida y tratamiento de cenizas

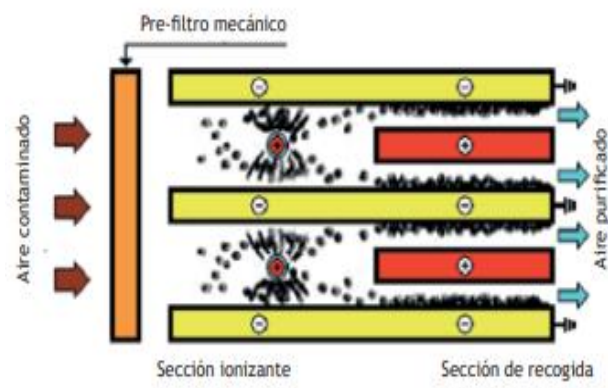
Para esta labor, se usan una serie de equipos, tales como ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas e inyectores de gases. Los ciclones son usados en la eliminación de las partículas de mayor tamaño, para lo cual la corriente gaseosa se introduce por la parte superior y es forzada a circular en espiral, lo que provoca el choque de las partículas con las paredes debido a la fuerza centrífuga, estas caen por acción de la gravedad. En los precipitadores electrostáticos, circulan gases por su interior, es en esa zona donde las partículas son ionizadas y luego recolectadas por acción electrostática. Los filtros de mangas que son usados para la eliminación de partículas pequeñas, se usan forzando los gases a través de mallas, en donde quedan retenidas las partículas sólidas. Las cenizas de fondo, producidas por la parrilla del horno en el proceso de incineración, son de gran tamaño y están compuestas principalmente por óxidos inorgánicos, “metales pesados de baja volatilidad y materia carbonosa residual. No obstante, debido a las condiciones severas en el horno de combustión se encuentran sinterizadas, por lo que no constituyen un gran problema” (Aracil, 2008, p. 60). Las cenizas volantes que son recolectadas, deben ser tratadas por inertización, estabilización o tratamiento térmico antes de su disposición final, (Figuras 3-13,3-14,3-15).



Fuente:

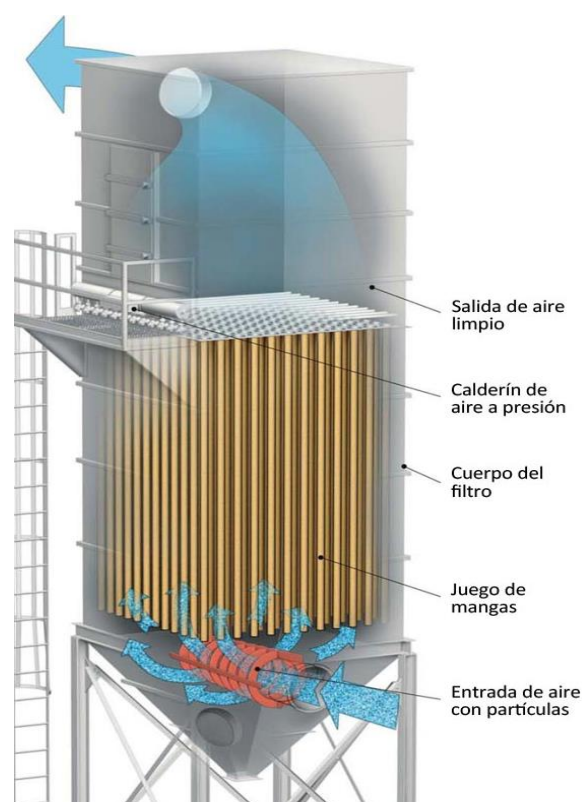
http://www.diquima.upm.es/old_diquima/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/Descr6.htm.

Figura 3-13. Diseño de ciclón de gases.



Fuente: <http://www.tecna.es/images/pdfadjunto/CRYSTALL.pdf>.

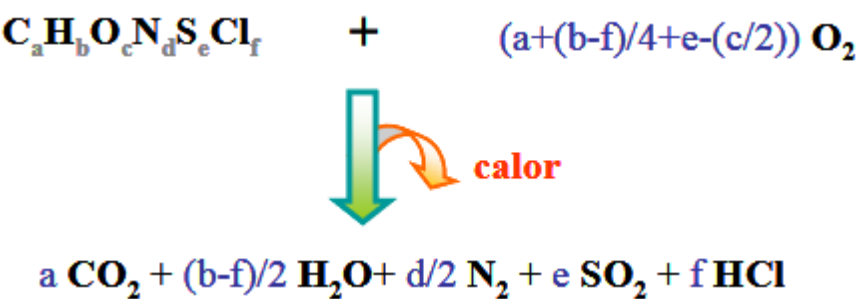
Figura 3-14. Diseño de precipitador electrostático.



Fuente: <http://www.gamoher.com/index.php/filtros-de-mangas-2/>.

Figura 3-15. Diseño de precipitador electrostático 1.

En relación a la combustión, esta se define como un proceso de carácter exotérmico, en el cual se hacen reaccionar materiales altas temperaturas (presencia de oxígeno). Durante aquella reacción, la energía química del combustible se libera en forma de calor. La ecuación que define una reacción de combustión, en teoría, con presencia de elementos como el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro, oxígeno (propio de los materiales más el oxígeno estequiométrico) se expresa así:



Fuente: Aracil, 2008, p. 55.

Figura 3-16. Ecuación de reacción general de combustión, con C, H, O, N, S y Cl y oxígeno estequiométrico.

La combustión no será completa puesto que no es un proceso ideal. Por lo cual, pueden producirse más compuestos. Además, el cloro presente, forma inicialmente cloruro de hidrógeno (HCl) “aunque en presencia de un exceso de oxígeno se establecerá un equilibrio entre aquel compuesto y el Cl₂ gas. En cuanto al nitrógeno del residuo, en principio el compuesto mayoritario que se forma es N₂ gas” (Aracil, 2008, p. 55). Sin embargo, pueden generarse bajo ciertas condiciones, óxidos de nitrógeno.

Un factor a considerar en la combustión, es la relación de oxígeno (λ). Esta, se refiere al oxígeno utilizado y el oxígeno estequiométrico, que se requiere para realizar la combustión de manera completa. “Este parámetro se puede determinar teniendo en cuenta la composición elemental de la muestra y los caudales de entrada de muestra y aire” (Aracil, 2008, p. 206).

Sabiendo que los polímeros a tratar, contienen ciertos elementos (principalmente C, H, O, Cl), λ corresponde a:

$$\lambda = \frac{(m_{aire})_{utilizado}}{(m_{aire})_{esteq}} = \frac{(m_{aire})_{utilizado} \cdot 23}{(m_{muestra}) \cdot \left(\frac{\%C}{12} + \left(\%H - \frac{\%Cl}{35.5} \right) \frac{1}{4} + \frac{\%S}{32} - \frac{\%O}{32} \right) \cdot 32}$$

Fuente: Aracil, 2008, p. 206.

Figura 3-17. Relación de oxígeno en el proceso de combustión.

Donde:

- λ = relación de oxígeno en la combustión
- m_{aire} = caudal másico de aire
- m_{muestra} = caudal másico de muestra
- ()_{esteq} = estequiométrico
- %C; %H; %Cl; %S; %O = porcentajes en masa de elementos (carbono, hidrógeno, cloro, azufre y oxígeno)

Aracil (2008) señala que

Un valor de λ menor que 1 implica condiciones de oxígeno subestequiométricas, mientras que si λ es mayor que 1 existe un exceso de oxígeno por encima del valor estequiométrico. Los experimentos realizados en ausencia de oxígeno tienen, evidentemente, un valor de λ igual a 0. (p. 206).

La incineración como tal, consta de ciertos elementos y parámetros. En la cámara primaria se produce la combustión del residuo en condiciones de defecto de oxígeno, entre un 50% y un 80% del requerimiento estequiométrico. La temperatura de la cámara varía entre 600 y 900°C y el tiempo de residencia del residuo varía entre 30 y 45 minutos. Luego, los gases producidos en la combustión, entre los cuales se encuentran productos volátiles, alimentan la cámara de postcombustión (segunda cámara). En esta zona, se inyecta aire adicional para completar el proceso de combustión. “El tiempo de residencia de los gases en la cámara secundaria debe ser superior a 2 segundos, la temperatura mayor de 850°C y la turbulencia lo suficientemente buena como para favorecer un buen mezclado con el aire” (Aracil, 2008, p. 57).

3.4.4. Equipos necesarios

Los procesos más importantes según el enfoque de este trabajo, corresponden a la incineración y la recuperación de energía. Para realizar estas tareas se necesita equipos apropiados, tales como:

1. Hornos de incineración.
2. Intercambiadores de calor.
3. Turbinas de vapor.

3.4.4.1. Hornos de incineración

Existen varias opciones relacionado a los tipos de hornos de incineración. Por una parte, pueden ser diseñados y construidos (cumpliendo con las normativas), por otro lado, hay hornos ya definidos. A continuación, se describen algunos de estos:

Hornos de parrilla móvil

Poseen 2 cámaras de combustión, en la primera se ubica una cinta transportadora de elementos resistentes a las altas temperaturas, estas, son refrigeradas por aire o agua y se encuentran inclinadas aproximadamente a 25°. Debajo de esta cinta, se inyecta aire que atraviesa los materiales a incinerar. Sobre esta cámara, se encuentra una cámara secundaria en la que se suministra aire adicional para completar la combustión de los gases. “El aire en exceso total varía entre el 100% y el 200% respecto al estequiométrico” (Aracil, 2008, p. 57). El tiempo de residencia es variado, pero normalmente se ajusta entre 30 y 45 minutos. Se aprecian en la figura 3-18, letra a.

Horno rotatorio

En relación a estos, Aracil (2008) señala:

constan de un cuerpo cilíndrico recubierto de refractario y dispuesto horizontalmente, con una suave pendiente (1-5%) entre la entrada y la salida para facilitar el desplazamiento del residuo. El horno descansa sobre rodamientos que controlan la velocidad de giro del mismo, que suele variar entre 0.5 y 3 rpm y condiciona, junto con la longitud e inclinación del horno, el tiempo de residencia medio de los sólidos en el mismo. Estos hornos poseen la mayor versatilidad en cuanto a las condiciones de operación y a la capacidad de procesar prácticamente cualquier tipo de residuos, y son muy utilizados en el tratamiento de residuos tóxicos y peligrosos (p. 57-58).

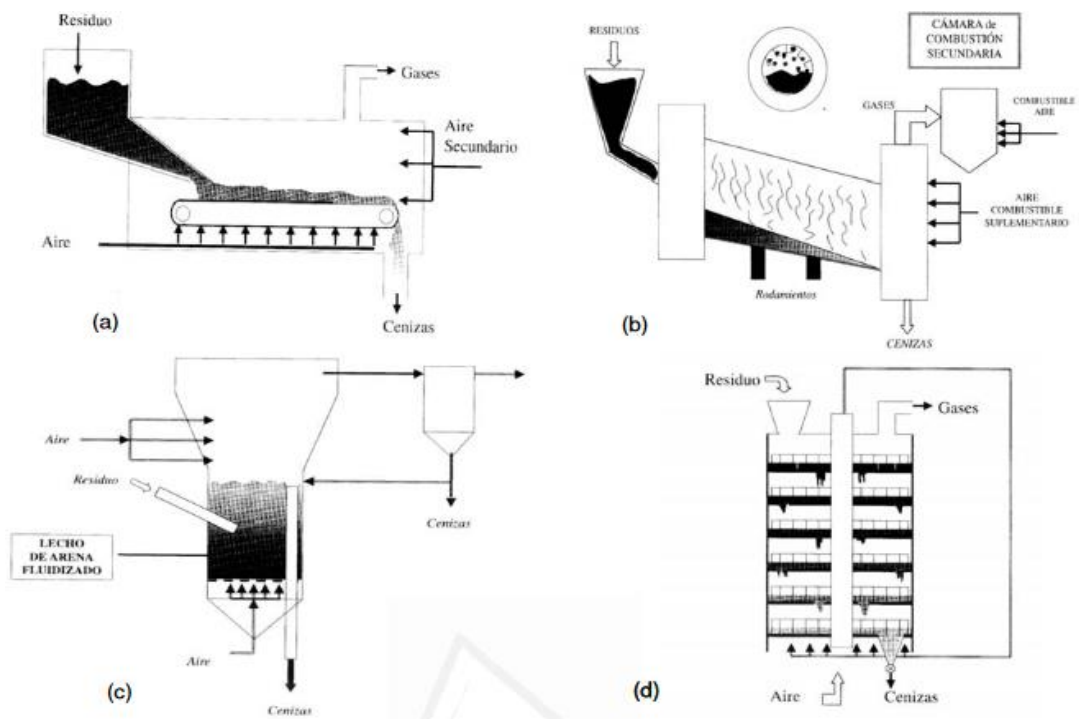
Además, “en la cámara de combustión secundaria se produce la mayor parte de la combustión de los productos gaseosos que se obtienen en el horno, con el objeto de garantizar la combustión completa de los residuos” (Moltó, 2007, p. 38). Las temperaturas de operación típicas están en los rangos de 650 a 1.250 °C en la primera cámara, de 850 a 1.600 °C en la segunda cámara. El tiempo de estadía de los gases es de 1 a 3 segundos en la cámara secundaria. Es presentado en la figura 3-18, letra b.

Hornos incineradores de lecho fluidizado

El horno está dispuesto verticalmente, siendo cilíndricos recubiertos de refractarios y con una altura de alrededor de 15 metros. Estos incineradores tienen un lecho de arena, alúmina o carbonato de calcio. Estos son mezclados con las sustancias a incinerar, las que son forzadas a través de los lechos mediante inyección con aire. Esto permite un buen mezclado con el exceso de aire alcanzándose temperaturas de alrededor de 900°C, con una eficiencia térmica superior a la de los hornos rotatorios (figura 3-18, letra c). Los gases de combustión pasan luego a una segunda cámara para completar el proceso de incineración. Además, se produce un contacto bastante eficaz entre el material a incinerar y el aire requerido para la combustión, “lo que permite operar a temperaturas más bajas, trabajar con tiempos de residencia de los sólidos menores y no tener que forzar el exceso de aire para asegurar la combustión completa de los residuos” (Aracil, 2008, p. 58).

Hornos de pisos

Una cámara verticalmente dispuesta, recibe desde la parte superior la entrada de material, en su interior posee una serie de plataformas inclinadas. “Un sistema de brazos unidos a un eje central va removiendo la capa de sólidos en cada piso y empujándola a la sección de caída” (Aracil, 2008, p. 58). La zona superior corresponde al secado y calentamiento del material, la zona intermedia es donde ocurre la combustión y finalmente la zona inferior, es donde se enfrían las cenizas. Este tipo de horno, es utilizado principalmente, en la incineración de lodos de depuradoras. Se visualiza en la figura 3-18, letra b que se presenta a continuación.



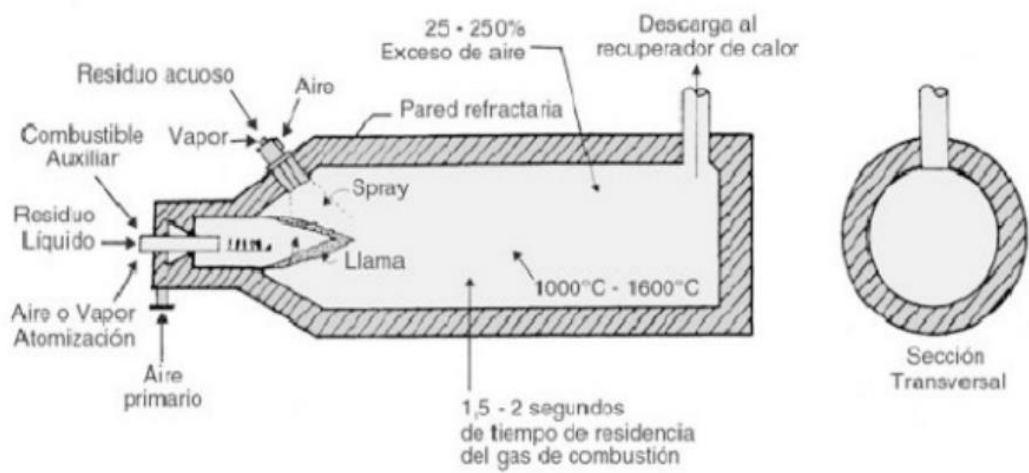
Fuente: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf.

Figura 3-18. Hornos de incineración, horno de parrilla móvil (a), horno rotatorio (b), horno de lecho fluidizado (c) y horno de pisos (d)

Hornos incineradores de inyección líquida

Construido como cilindros revestidos con ladrillos refractarios, que pueden ser verticales u horizontales y contar con uno o más quemadores. Las temperaturas de operación están en el rango de 1.000 a 1.600 °C y los tiempos de residencia entre 1,5 y 2

segundos. Hecho para ser utilizado únicamente con líquidos bombeables. Es representado en seguida, en la figura 3-19:



Fuente:

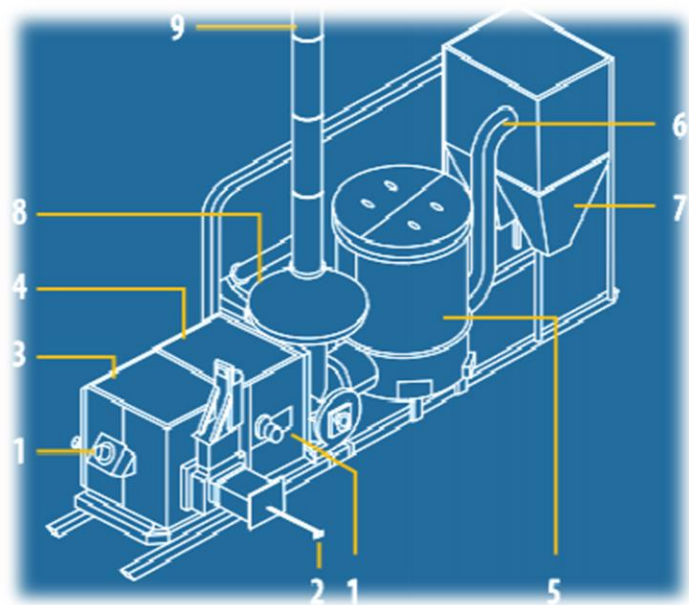
[http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Residuos/Peligrosos/Cartillas/Protocolo%20requerimientos%20tecnicos%20y%20normativos%20para%20hornos%20in cineradores.pdf](http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Residuos/Peligrosos/Cartillas/Protocolo%20requerimientos%20tecnicos%20y%20normativos%20para%20hornos%20in%20cineradores.pdf)

Figura 3-19. Hornos de incineración de inyección líquida.

En gran parte de los casos, los sistemas dentro de un horno incinerador corresponden a:

1. Quemadores.
2. Sistema de alimentación mecánica de accionamiento manual o automático.
3. Cámara de combustión diseñada térmica apropiada.
4. Cámara de postcombustión.
5. Intercambiador de Calor.
6. Agente neutralizante de gases ácidos.
7. Filtro de mangas.
8. Adsorbente de dioxinas, furanos y metales pesados.
9. Chimenea.

Estos pueden observarse en la figura 3-20:



Fuente:

<http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Residuos/Peligrosos/Cartillas/Protocolo%20requerimientos%20tecnicos%20y%20normativos%20para%20hornos%20in cineradores.pdf>.

Figura 3-20. Sistemas típicos de un horno de incineración.

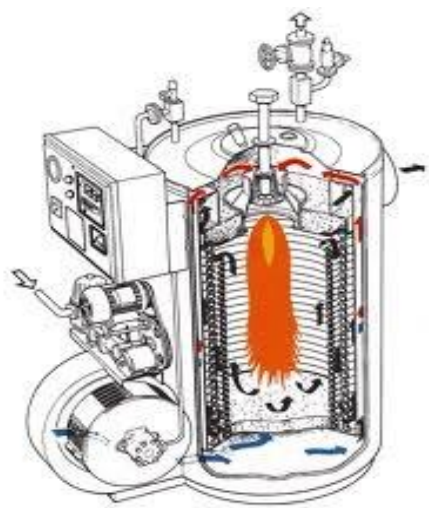
3.4.4.2. Calderas

Corresponde a una unidad diseñada para calentar un fluido térmico o para generar vapor de agua, mediante la acción del calor. “Dicho dispositivo actúa como horno o intercambiador, transfiriendo calor del combustible que se quema a los tubos por donde circula agua gracias a una bomba”. (González et al., s.f., p. 1). Estas pueden ser clasificadas, entre otras categorías, según su sistema interno de flujos:

- Calderas acuotubulares.
- Calderas pirotubulares.

Calderas acuotubulares

En su constitución, un conjunto de tuberías se encuentra en el interior, por las cuales circula el fluido de trabajo. El cual es calentado por los gases que se mueven por el exterior, provenientes de la zona de combustión (a alta temperatura). “Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas suelen ser superior al requerido para otro tipo de calderas” (González et al., s.f., p. 1). En la figura 3-21 se aprecia un ejemplo de este tipo de calderas:

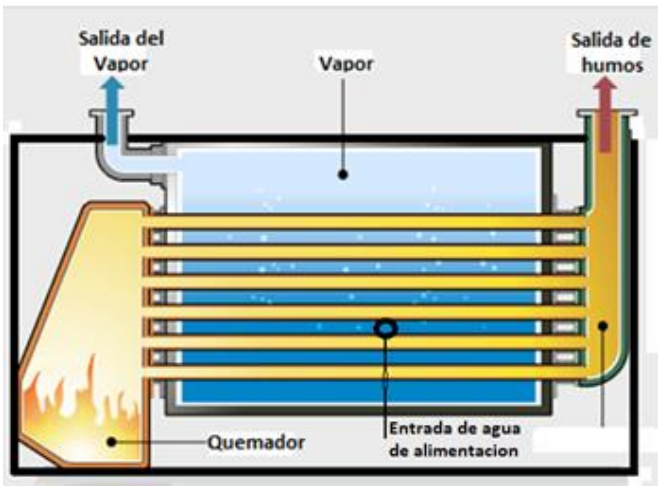


Fuente: <https://www.absorsistem.com/tecnologia/calderas/acuotubular>.

Figura 3-21. Caldera acuotubular con disposición vertical.

Calderas pirotubulares

Corresponden a aquellas calderas en cuyo diseño, se encuentran un conjunto de tubos en su interior por los cuales, a diferencia de las calderas acuotubulares, se mueve el flujo de gases calientes provenientes de la zona de combustión. Mientras que en el exterior de los tubos se eleva la temperatura del fluido (figura 3-22). En estas, “las exigencias de calidad de agua de alimentación son menores a las requeridas en las calderas acuotubulares” (González et al., s.f., p. 1).



Fuente:

[http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Calderas/preguntas_y_respuestas_sobre_calderas.ht](http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Calderas/preguntas_y_respuestas_sobre_calderas.html)
ml

Figura 3-22. Funcionamiento de una caldera pirotubular.

3.4.4.3. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son equipos de gran variedad y formatos, su función es transferir calor entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento o entre dos fluidos. Dicha transferencia de calor, se logra debido a que los fluidos involucrados están a temperaturas diferentes. Este proceso ocurre en una sola dirección, desde fluido o superficie solida con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura. Como Jaramillo (2007) indica:

“En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan”. (p. 3).

Los intercambiadores de calor pueden dividirse, al igual que las calderas, en distintas categorías. Sin embargo, para efectos de este estudio basta con segmentarlos según su estructura:

- Carcasa y tubos.
- De placas.

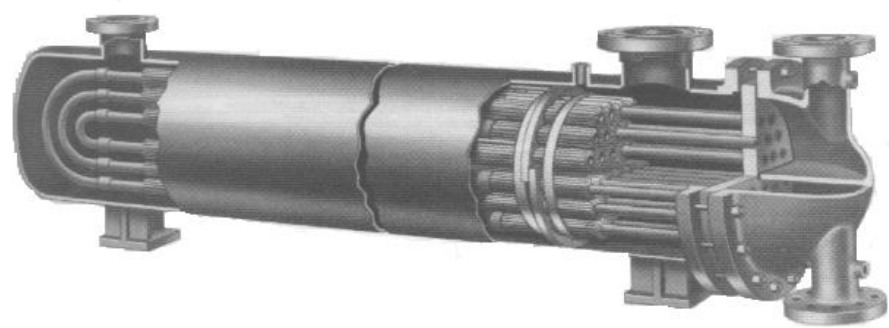
De carcasa y tubos

Este, consiste en un grupo de tubos alojados en un tanque denominado carcasa. Al movimiento de fluido dentro de los tubos se le llama flujo interno, mientras que el que fluye en el interior del contenedor, se le llama fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo por las placas de tubo; los tubos se fijan a una placa, obteniendo un cierre adecuado.

Según Jaramillo (2007):

“En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido con una presión más baja se circula del lado de la cáscara”. (p. 3).

En la figura 3-23 se aprecia un ejemplo de este tipo de intercambiadores de calor:

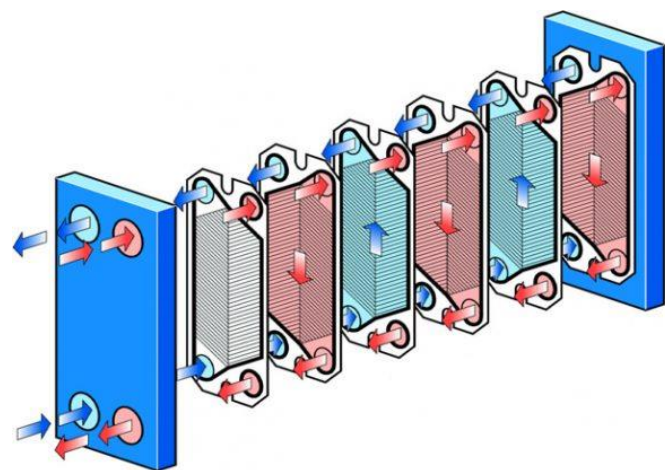


Fuente: <https://www.monografias.com/docs113/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares.shtml>.

Figura 3-23. Intercambiador de calor de tipo carcasa y tubos.

De placas

En este tipo de intercambiador de calor emplea una serie de placas con relieves, que van colocadas una sobre la otra (adyacentes y en contacto), separadas por juntas de plástico resistente que a su vez, configuran pequeñas recamaras intercaladas. Este bloque conjunto, posee en los extremos, unos canales formados por la suma de agujeros en cada placa superpuesta. Gracias a esto, circulan los flujos fríos y calientes a través del intercambiador de calor y van llenado las recamaras de color rojo y azul que se muestran en la figura 3-24. “Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, las placas proveen un área extremadamente grande de transferencia de térmica a cada uno de los líquidos” (Jaramillo, 2007, p. 4).



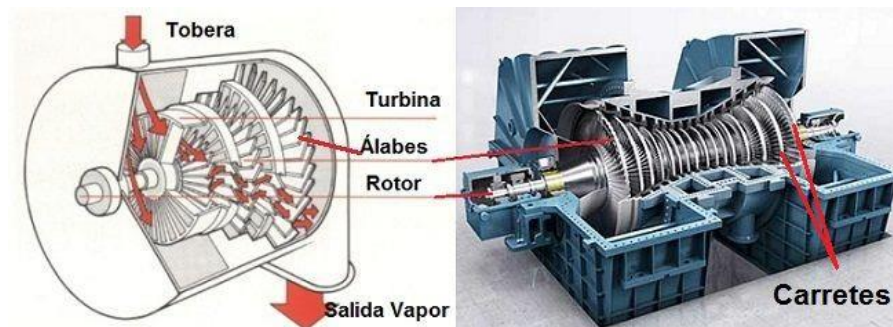
Fuente: <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>.

Figura 3-24. Intercambiador de calor de placas.

3.4.4.4. Turbinas de vapor

Si bien existen turbinas de otros tipos, accionadas con gas por ejemplo, para este trabajo corresponden aquellas accionadas por vapor. Las cuales, son equipos en los que se introduce vapor a una temperatura y presión determinadas, el cual hace girar unos álabes unidos a un eje rotor. El vapor transfiere su energía a la turbina; transforma su entalpia en energía cinética la que es aprovechada por los rodets.

En la figura 3-25 se muestra una turbina y sus partes internas más relevantes:



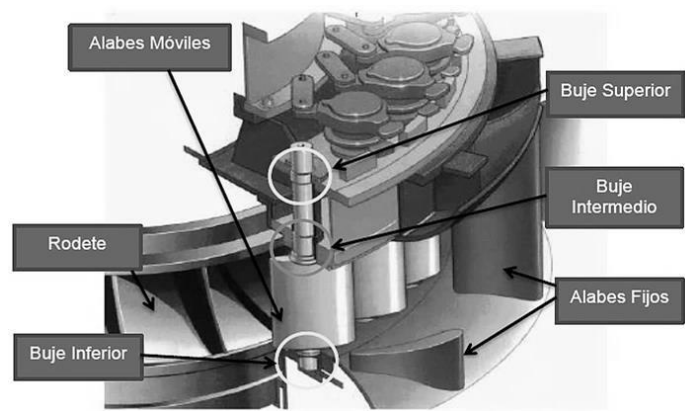
Fuente: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>.

Figura 3-25. Partes internas de una turbina de vapor.

Existen varias clasificaciones de las turbinas de vapor, algunas de estas son:

Según la forma en que se realiza la transformación de energía térmica en energía mecánica

1. Turbinas de acción. En las cuales la transformación se realiza en los álabes fijos. El vapor se distribuye a toda la sección por medio de toberas. A la salida de las toberas, la energía del vapor se transforma en energía cinética que mueve los álabes. Suelen tener varias toberas de entrada de vapor.
2. Turbinas de reacción. En ellas dicha transformación se realiza a la vez en los álabes fijos y en los álabes móviles. También llamadas solo turbinas de reacción. Están formadas por carretes con álabes fijos y álabes móviles montados de forma alternativa. Los fijos actúan como toberas dirigiendo el vapor al siguiente carrete móvil.



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Corte-transversal-de-una-turbina-Francis-Fuente-Autores_fig1_331794048.

Figura 3-26. Ejemplo de álabes fijos y móviles.

Según la presión del vapor de salida

RENOVETEC. (s.f.). *TURBINAS DE VAPOR*.
<http://www.cicloscombinados.com/turbinavapor.html>

- 1. Contrapresión. En ellas el vapor de escape es utilizado posteriormente en el proceso.
- 2. Escape libre. El vapor de escape se libera a la atmósfera. Este tipo de turbinas no aprovecha el vapor de escape en otros procesos.
- 3. Condensación. En las turbinas de condensación el vapor de escape es condensado con refrigerantes.

Según la dirección del flujo en el rodete

RENOVETEC. (s.f.). *TURBINAS DE VAPOR*.
<http://www.cicloscombinados.com/turbinavapor.html>

- 1. Axiales. El paso de vapor se realiza siguiendo un cono que tiene el mismo eje que la turbina.
- 2. Radiales. El paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina.

CAPÍTULO 4: APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

4. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Presentes en este capítulo se encuentran conceptos, ecuaciones y cálculos relacionados a la manera, en cómo puede ser aprovechada la energía producida en los procesos de incineración, tratados en el capítulo anterior.

La valorización o valoración (significado similar, según RAE) energética se refiere al aprovechamiento de desechos antes de su disposición final. Para esto, se aplican procesos que minimizan el volumen de residuos, en los cuales puede generarse energía. Si los procesos de valorización energética son implementados de forma correcta y se someten continuamente a mejoramiento, tienen la capacidad de contribuir de manera positiva a la situación actual de la contaminación, aunque de todos modos, es recomendable la aplicación de reciclaje para disminuir la cantidad de residuos desde el origen.

4.1. CONCEPTOS

A continuación, se definen conceptos importantes para este estudio:

- Sistema.
- Energía.
- Energía interna.
- Entalpía.
- Calor.
- Calor específico.
- Poder calorífico.
- Trabajo.
- Potencia.
- Eficiencia.

4.1.1. Sistema

Entiéndase sistema, como un segmento del universo el cual es sometido a estudio. En los sistemas, se puede analizar la transferencia de masa y energía, dentro de

los mismos. “Todo sistema queda limitado por un contorno, paredes, fronteras o límites del sistema, que pueden ser reales o imaginarios” (Ejemplos de Cambios de Unidades, 2004, p. 10).

4.1.2. Energía

La energía corresponde a la capacidad que tiene la materia de producir cambios. Es decir, que la energía de un sistema, se define como la capacidad de dicho sistema para realizar un trabajo. La energía puede manifestarse de diversas maneras, en forma de movimiento o cinética, energía potencial, calor, entre otras.

Fraile (2007) establece que:

La verdadera naturaleza de la energía no se conoce, sino que se distingue por sus efectos. La energía se mide por la cantidad de trabajo que puede proporcionar, por tanto sus unidades de medida son las mismas que las del trabajo. (p. 8).

A la energía se le asigna la letra E y como unidad puede usarse el Julio (J), equivalente al trabajo necesario para alzar el peso de 1 Newton, una altura de 1 metro.

4.1.3. Energía interna

La energía interna de un cuerpo es la suma de la energía contenida en cada una de las moléculas del mismo. En términos físicos, es la adición de la energía cinética de traslación de las moléculas, la energía cinética de rotación de las moléculas, la energía cinética de vibración de los átomos, la energía química de enlaces entre átomos, la energía de los enlaces entre el núcleo y electrones, la energía de enlace entre partículas del núcleo, la energía de enlace entre las partículas subatómicas, etc. Debido al principio de conservación de energía, para sistemas cerrados en reposo, se cumple que:

$$\Delta U = Q - W$$

Se muestra ecuación de energía interna, fuente: Ejemplos de Cambios de Unidades, 2004, p. 49.

Donde:

Δ = variación

U = energía interna

Q = calor

W = trabajo

4.1.4. Entalpia

Luego de haber definido la energía interna, se puede avanzar a la entalpia. Esta, corresponde a la suma entre la energía interna de un cuerpo y la energía de presión del mismo en un sistema termodinámico; la cual puede intercambiar con su entorno, en condiciones de presión constante. “En los líquidos y sólidos, que son prácticamente incompresibles, es aproximadamente igual a la energía interna” (Fraile, 2007, p. 10).

$$H = U + PV$$

Se muestra ecuación entalpía, fuente: Trigo, s.f., p. 3.

Donde:

H = entalpia

U = energía interna

P = presión del sistema

V = volumen del sistema

4.1.5. Calor

Se puede definir como la alteración que ocurre entre cuerpos diferentes que entran en contacto, los cuales poseen distinta temperatura. “El calor, como el trabajo son energías en tránsito, es decir, se manifiestan en las transformaciones, por lo que no tiene sentido decir que un cuerpo tiene mucho calor o poco trabajo, sino mucha energía” (Fraile, 2007, p. 9). Al igual que en la energía, puede usarse el Julio o también la caloría (cal), entre otras. Una caloría es el calor que hay que entregar a 1 g de agua para subir su temperatura 15 °C a 16 °C. La relación entre ambas unidades es, 1 cal = 4,184 J.

4.1.6. Calor específico

El calor específico o capacidad térmica específica, se define como la cantidad de calor necesaria que se debe proveer a una unidad de masa de una sustancia o sistema, para elevar su temperatura en una unidad; “es la cantidad de calor necesaria para elevar en 1°C la temperatura de 1 kg de determinada sustancia. El calor específico varía con la temperatura. En la práctica se considera el calor específico medio en un intervalo de temperaturas” (Morales et al., 2013, p. 19). El calor específico es característico para cada sustancia, puede medirse en Julios por kilogramo Kelvin (J/kgK).

$$Q_{ap} = m * C_{pap} * \Delta T$$

Se muestra ecuación calor (Q), relacionado a los cálculos de energía para un horno, fuente: Auces, 2003, p. 4.

De la ecuación anterior, se retiran los subíndices “ap” y “pap”, ya que no aplican como nombres o referencias en este trabajo y se despeja el calor específico (C), obteniendo:

$$C = Q / (m * \Delta T)$$

Se muestra ecuación de calor específico.

Donde:

C = calor específico

Q = calor

m = masa

ΔT = variación de temperatura

4.1.7. Poder calorífico

El poder calorífico de un material o sustancia, se define como la cantidad de energía liberada en una reacción de combustión completa, por unidad de masa o de volumen. Existen dos tipos de poder calorífico, el superior (PCS) y el inferior (PCI):

4.1.7.1. Poder calorífico superior

El PCS es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible, “a 0 °C y a 760 mm de Hg de presión, cuando todos los productos de la combustión se reducen a las mismas condiciones” (Agüero, 2004, p. 2); teniendo en cuenta que el vapor de agua originado en la combustión está condensado, se contabiliza el calor desprendido en este cambio de fase.

4.1.7.2. Poder calorífico inferior

El PCI es la cantidad total de calor que se libera en la combustión completa de 1 kg de combustible, sin contar la parte correspondiente al calor latente (cantidad de energía requerida por una sustancia para cambiar de fase) del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

Teniendo en cuenta la ecuación 4-4, sabiendo que el poder calorífico se expresa en unidades de energía calórica, resulta lo siguiente:

$$PC = Q/m$$

Se muestra la ecuación poder calorífico.

Donde:

PC = poder calorífico

Q = calor

m = masa

4.1.8. Trabajo

La definición de trabajo, puede hacerse en términos de la termodinámica o desde el enfoque de la mecánica. Según la primera, el trabajo se estudia desde el punto de vista de un sistema. Por ejemplo, “cuando un sistema ejerce una fuerza sobre su entorno, provocando el desplazamiento de la frontera, el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento de la frontera es el trabajo realizado por el sistema” (Ejemplos de Cambios de Unidades, 2004, p. 26). Luego, en términos de mecánica, se habla de trabajo físico cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo y ejerce el desplazamiento del mismo. El valor del trabajo realizado por la fuerza se obtiene de la multiplicación del espacio recorrido por el cuerpo y la magnitud de la fuerza en la dirección del desplazamiento. “La Mecánica define el trabajo como el producto escalar de una fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación” (Ejemplos de Cambios de Unidades, 2004, p. 26). La ecuación de trabajo corresponde a la siguiente:

$$W = F \cdot e$$

Se Muestra la ecuación de trabajo, fuente: Fraile, 2007, p. 8.

Donde:

W= trabajo

F = magnitud de la fuerza

e = desplazamiento del cuerpo

Finalmente, “la unidad de trabajo en el sistema internacional de unidades (SI) es el Julio (J), que es el trabajo realizado al mover un objeto un metro de distancia, con una fuerza de 1 Newton (N)” (Fraile, 2007, p. 8-9).

4.1.9. Potencia

Se define como la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo y se expresa de la siguiente forma:

$$P = \frac{W}{t}$$

Se muestra la ecuación de potencia, fuente: Fraile, 2007, p. 9.

Donde:

P = potencia

W= trabajo

t = tiempo

4.1.10. Eficiencia

Para definir la eficiencia, también llamada rendimiento, hay que entender los principios de la termodinámica (primera y segunda ley).

- La primera ley de la termodinámica se relaciona con el principio de conservación de energía, lo que significa que la energía en un sistema no se crea ni se destruye, solo se transforma.
- Segunda ley de la termodinámica. Cuando se habla de transferencias de calor, estas siempre ocurren desde el cuerpo más caliente al más frío, pero no al revés. Esto significa que los procesos de transferencia de energía térmica son irreversibles. O bien, el trabajo mecánico puede transformarse en calor, pero no todo el calor puede transformarse en trabajo mecánico. Es decir, que no es posible que el calor se convierta completamente en otra forma de energía. Por esta razón, el calor se considera una forma degradada de energía.

Ya que, “es imposible hacer pasar calor espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente, siendo necesario para ello aportar trabajo. La consecuencia del segundo principio es que no es posible crear un motor térmico que tenga rendimiento del 100 %” (Fraile, 2007, p. 11). Debido a esto, la eficiencia o rendimiento máximo se expresa según la siguiente la expresión:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Se muestra la ecuación de eficiencia máxima de una máquina accionada por calor, fuente: Fraile, 2007, p. 11.

Luego, en relación a máquinas térmicas, el rendimiento o eficiencia térmica es la relación entre el trabajo realizado y el calor suministrado a la máquina en cada ciclo. Su expresión corresponde a:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Se muestra la Ecuación de eficiencia térmica, fuente: Ejemplos de Cambios de Unidades, 2004, p. 130.

Donde:

η_{max} = eficiencia máxima

η = eficiencia

T_1 = temperatura absoluta del foco caliente

T_2 = temperatura absoluta del foco frío

W = trabajo

Q_1 = calor suministrado del foco caliente

Q_2 = calor cedido al foco frío

4.2. TRANSFORMACIÓN A ENERGÍA ELÉCTRICA

Al incinerar desechos plásticos, debido a su poder calorífico, liberan en forma de calor una considerable cantidad de energía, la cual es transferida a través de ciertos equipos (vistos con anterioridad) y transformada en corriente eléctrica. En seguida se abordan los datos y cálculos relacionados a la transformación en energía eléctrica.

4.2.1. Datos requeridos

Se toma un material a modo de ejemplo para realizar cálculos. En este caso, se utilizará el PVC. Además de necesitar valor de su poder calorífico, se necesitan los valores de las eficiencias de cada equipo (en este caso calderas y turbinas).

Según Bahamondes (2006):

Los factores que influyen en una caldera, considerando que un rendimiento de un 70% es el que se logra generalmente en la práctica, serían los siguientes:

a) Por combustión incompleta	9.80%
b) Por gases calientes de chimenea	14.00%
c) Por cenizas o escorias	2.85%
d) Por radiación y otras causas	3.35%
e) Rendimiento de la caldera	70.00% (p. 4).

Luego, en relación a la eficiencia de una turbina de vapor, un documento generado por la organización Technology Needs Assessment (TNA), presenta datos de eficiencia típica entre 80 % y 85 %.

Respecto de la energía eléctrica que suministran los proveedores, la unidad que se utiliza corresponde a kilo Watt por hora (kWatt*h). Para efectos de este trabajo, se toma como referencia la empresa Chilquinta Energía S.A. y una tarifa BT-1A (tarifa simple, en baja tensión, para clientes residenciales). En Noviembre del año 2020, en la región de Valparaíso, el precio aproximado de 1 kWatt*h es de \$207,6.

En resumen:

- Material = PVC
- Poder calorífico del material = 5,0 Mcal/kg
- 1 cal = 4,184 J
- 1 Watt = 1 J/s
- Eficiencia de la caldera = 70 %
- Eficiencia de la turbina = 80 %
- Funcionamiento = 2 turnos de 8 horas por 20 días (elegido para realizar cálculos)
- Valor del kWatt*h = \$207,6
- Caudal másico = 100 kg por hora (elegido para realizar cálculos)

4.2.2. Cálculos

Evalutando los datos se obtiene lo siguiente:

- $5 \frac{Mcal}{kg} * \frac{1.000 \text{ k}}{M} * \frac{4,184 \text{ J}}{cal} = 20.920 \frac{kJ}{kg}$
- $100 \frac{kg}{h} * 20.920 \frac{kJ}{kg} = 2.092.000 \frac{kJ}{h} * \frac{h}{3.600 \text{ s}} = 581,1 \frac{kJ}{s}$
- $581,1 \frac{kJ}{s} = 581,1 \text{ kWatt}$
- $581,1 \text{ kWatt} * 0,7 = 406,77 \text{ kWatt}$

- $406,77 \text{ kWatt} * 0,8 = 325,416 \text{ kWatt}$
- $20 \text{ días; } 2 \times 8 \text{ h} = 16 \text{ h} * 20 = 320 \text{ h} * 325,416 \text{ kWatt} = 104.133,12 \text{ kWatt*h}$
- $104.133,12 \text{ kWatt*h} * \$207,6 = \$21.618.035,712$

En teoría, si se incineran 100 kg de PVC por 2 turnos de 8 horas, por cada día durante un mes (20 días trabajados) con el valor aproximado de 1 kWatt*h, el valor estimado de venta de la energía es de \$21.618.035,712.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación al cumplimiento del objetivo general de estudiar contaminantes producidos en la incineración de polímeros para su eliminación y valorización energética, se logró. Luego, los objetivos específicos de desarrollar un levantamiento de información sobre la generación de desechos plásticos, se alcanzó en el capítulo 1. Describir el estado del arte respecto a la incineración de polímeros a nivel nacional e internacional, logrado en el capítulo 3. Finalmente, realizar evaluación técnico-económica del sistema propuesto, se consiguió en el capítulo 4.

Respecto de la información, es importante destacar que es necesaria una temperatura superior a 850 °C en la cámara de postcombustión y que la residencia de los gases en su interior, debe ser superior a 2 segundos. Se deben emplear métodos de atenuación e inhibición, en la formación de dioxinas y furanos como la inyección de óxido de calcio, evitar el ingreso de metales, como el cobre, los cuales actúan como catalizadores en las reacciones de formación. Utilizar equipos de alto rendimiento y establecer controles de emisión, a lo largo del tratamiento. Respetar los cuerpos legales al momento de realizar la disposición final de las cenizas producidas. Pero incluso con todo esto, se debe tener la claridad de que, aun así se emitirán pequeñas trazas de compuestos tóxicos. Esta es una opción para los desechos plásticos, comúnmente llamados “basura”. Difíciles de reciclar por sus mezclas, su deteriorada calidad y contaminación con otras sustancias.

Si bien, muchas industrias funcionan con 2 o 3 turnos laborales, para el cálculo teórico de este trabajo se determinaron 2 turnos, destinando el tiempo restante, para la mantención del sistema y la puesta en marcha de cada equipo. Luego se toma como referencia el PVC, que es un material plástico muy utilizado, por ejemplo en el rubro de la construcción. Determinando de manera arbitraria para efectos del cálculo teórico, un caudal másico de 100 kg de PVC por el tiempo ya señalado, se obtiene una producción de 104.133,12 kWatt*h. Si el valor aproximado en la región de Valparaíso en Noviembre del año 2020 es de \$207,6; entonces se obtiene un valor de venta de \$21.618.035,712 en energía eléctrica producida.

Se recomienda, la aplicación del concepto de “mejora continua”, para actualizar y fortalecer, con regularidad y a lo largo del tiempo, la solución propuesta. Además, es recomendado desarrollar más la viabilidad económica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J., & Bugeau, A. T. (2004). Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, 13(24), 33-37.
2. Álvarez, Mauro (2019). Pacto Chileno de los Plásticos busca frenar contaminación. *DIARIO CONCEPCION*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2019/05/22/pacto-chileno-de-los-plasticos-busca-frenar-contaminacion.html>
3. Aracil, I. (2008). Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Universidad de Alicante.
4. Auces, E. A., & Rodríguez, J. A. (2003). Cálculo de las necesidades de energía en un horno de relevo de esfuerzos. *Ciencia e Ingeniería*, 24(3), 3-6.
5. Bahamondes, P. A. (2006). Potencia y Rendimiento de la Caldera. Santiago de Chile.
6. BBC MUNDO (2017). Hay tantos residuos de plástico en el mundo que podrían cubrir un país como Argentina: la advertencia de un grupo científicos sobre la contaminación que acecha al nuestro planeta [en línea]. *BBC NEWS*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40664725>
7. Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10), 2-12.
8. Castells, X. E., & de Gracia, L. J. (2012). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración: Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos.
9. DE UNIDADES, E. D. C. (2004). TEMA 1-INTRODUCCIÓN. CONCEPTOS Y DEFINICIONES.

10. di Girolamo, Greta (2018). Guía para reciclar plástico: Una forma de detener el daño ecológico. ELDESCONCIERTO. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de
11. Fraile, D. (2007). Cogeneración: aspectos tecnológicos.
12. García, S. (2009). Referencias históricas y evolución de los plásticos. Revista Iberoamericana de polímeros, 10(1), 71-80.
13. González, D. E. C., Alfonso, N., Moreno, N., & Rincón, J. Clasificación, Principio de Funcionamiento y Uso Industrial de las Calderas.
14. Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía., México DF.
15. Moltó Berenguer, J. (2007). Descomposición térmica de residuos textiles: estudio cinético y formación de contaminantes. Universidad de Alicante.
16. Morales Cevallos, J. W., & Caisaguano Moreano, D. G. (2013). Diseño de un prototipo de incinerador para desechos hospitalarios.
17. Parker, Laura. (2019). Ahogados en un mar de plástico. NATIONAL GEOGRAPHIC ESPAÑA. Recuperado el 23 de Noviembre de 2019, de https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/grandes-reportajes/ahogados-mar-plastico_12712/17
18. Perdomo, G. A. (2002). Plásticos y medio ambiente. Revista Iberoamericana, 3, 1-13.
19. Pérez, J. O. H. N., Espinel, J. O. R. G. E., Ocampo, A. L. O. N. S. O., & Londono, C. A. R. L. O. S. (2001). Dioxinas en procesos de incineración de desechos. Dyna, 134, 65-75.
20. RENOVETEC. (s.f.). TURBINAS DE VAPOR. Recuperado el 17 de Abril de 2020, de <http://www.cicloscombinados.com/turbinavapor.html>
21. Trigo, S. ENTALPÍA Y ENTROPÍA: ORIGEN Y APLICACIÓN.

22. Wong, A. (2006). Planta de reciclaje de residuos sólidos domiciliarios mediante incineración.