



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE BIOLOGÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESTIMACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA INCINERADORA DE  
RPBI EN MÉXICO**

Tesis para obtener el grado de  
**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

presenta

**ALEJANDRA DÍAZ AGUILAR**

Ingeniera Ambiental

Directora de Tesis:

**Dra. Liliana Márquez Benavides**

Co-Directora de Tesis:

**Dra. Quetzalli Aguilar Virgen**

**Morelia, Michoacán, noviembre del 2022**

## **RESUMEN**

En los últimos años, la producción de residuos ha ido en aumento, lo que hace muy importante su tratamiento y disposición final. Los residuos peligrosos biológico infecciosos (RPBI) son materiales generados durante los servicios de atención médica que contengan agentes biológico infecciosos y que puedan tener efectos nocivos a la salud y al ambiente. Los RPBI deben ser tratados por métodos fisicoquímicos para asegurar la destrucción de microorganismos patógenos, ser incinerados o inhumados y deben hacerse irreconocibles para su disposición final. La incineración es uno de los métodos de eliminación definitiva más eficiente, ya que puede reducir hasta un 90% en volumen y un 70% en peso y se obtiene una eliminación adecuada. Sin embargo, puede ser una de las tecnologías con mayor impacto negativo en el medio ambiente. El objetivo de esta investigación fue determinar el impacto ambiental y los hotspots dentro del proceso de incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos en una planta incineradora. Esto mediante la combinación de las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y mapeo de flujo de valor, dos herramientas utilizadas para la identificación de impactos ambientales y la optimización de cualquier proceso o sistema. Los resultados muestran los impactos ambientales de la incineración de RPBI. A través de la mejora continua, aumento la eficiencia del proceso de combustión, disminuyo el tiempo de operación, por lo tanto se necesita menos combustible, y con ello se observa una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** Análisis de ciclo de vida, incineración, residuos, mejora continua.

## **ABSTRAC**

In recent years, the production of waste has been increasing, which makes its treatment and final disposal very important. Biological infectious hazardous waste (BIHW) are materials generated during health care services that contain infectious biological agents and that may have harmful effects on health and the environment. They must be treated by physicochemical methods to ensure the destruction of pathogenic microorganisms, incinerated or inhumed and rendered unrecognizable for final disposal. Incineration is one of the most efficient final disposal methods, as it can reduce up to 90% by volume and 70% by weight and adequate disposal is obtained. However, it can be one of the technologies with the greatest negative impact on the environment. The objective of this research was to determine the environmental impact and hotspots within the incineration process of biohazardous biological infectious waste in an incineration plant. This was done by combining Life Cycle Assessment (LCA) and value stream mapping methodologies, two tools used for the identification of environmental impacts and the optimization of any process or system. The results show the environmental impacts of the incineration of BIHW. Through continuous improvement, the efficiency of the combustion process increased, the operation time decreased, therefore less fuel was needed, and with this, a reduction in CO<sub>2</sub> emissions is observed.

# Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1    MARCO TEÓRICO.....	4
1.1    Residuos.....	4
1.1.1    Residuos peligrosos .....	5
1.1.2    Residuos Peligrosos Biológico-Infeciosos .....	5
1.1.3    Infraestructura instalada para el manejo de RPBI en México .....	6
1.1.4    Opciones tecnológicas para tratamiento de RPBI. ....	13
1.2    Incineración .....	14
1.3    Metodologías de análisis de impacto ambiental .....	16
1.3.1    Métodos de listas de verificación .....	16
1.3.2    Métodos de matrices.....	17
1.3.3    Métodos de redes .....	17
1.3.4    Métodos de superposición .....	17
1.3.5    Métodos Ad Hoc.....	17
1.3.6    Talleres de modelado de simulación (simulación y predicción) .....	18
1.3.7    Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	18
1.3.8    Comparación de las metodologías de evaluación de impacto ambiental .....	20
1.4    Métodos de mejora continua.....	22
1.4.1    Las 5S .....	24
1.4.2    Cambio rápido de herramientas SMED.....	24
1.4.3    Mantenimiento Productivo Total TPM .....	24
1.4.4    Jidoka.....	25
1.4.5    Mapeo de Flujo de Valor .....	25
1.5    ANTECEDENTES .....	31

1.5.1	Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de gestión de residuos.....	31
1.5.2	Análisis de ciclo de vida aplicado a incineración de residuos sólidos .....	31
1.5.3	<i>Lean manufacturing</i> aplicado a sistemas de gestión de residuos .....	32
1.5.4	<i>Lean Green</i> aplicado a sistemas de gestión de residuos.....	32
CAPÍTULO 2 Proceso de incineración.....		34
2.1	Definición de incineración.....	34
2.1.1	Combustión.....	34
2.1.2	Tópicos seleccionados sobre procesos de combustión.....	36
2.1.2.1	Combustión gaseosa.....	36
2.1.2.2	Combustión líquida .....	37
2.1.2.3	Combustión sólida.....	37
2.2	Energía térmica .....	38
2.2.1	Calor de reacción .....	38
2.2.2	Calor sensible de los gases .....	39
2.2.3	Calor latente.....	39
2.2.4	Energía cinética y potencial.....	39
2.2.5	Pérdidas de calor.....	39
2.3	Balances de materia .....	40
2.3.1	Balances basados en análisis de combustible.....	40
2.4	Balances de energía .....	41
2.5	Cinética de la combustión.....	41
2.5.1	Mecanismo de la cinética general.....	42
2.5.2	Cinética de la oxidación del monóxido de carbón.....	42
2.5.3	Cinética de la oxidación de hollín .....	42
2.6	Caracterización de los residuos.....	43

2.6.1	Composición química de los residuos .....	44
2.6.2	Calor de combustión.....	44
2.6.3	Residuo sólido .....	44
2.6.3.1	Composición de los residuos sólidos .....	44
2.7	Transferencia de calor.....	45
2.7.1	Conducción.....	45
2.7.2	Convección.....	45
2.8	Escoria y ensuciamiento .....	45
2.9	Preparación y manipulación de residuos sólidos .....	46
2.9.1	Manejo de residuos sólidos en fosos y grúas.....	46
2.9.2	Reducción de tamaño de RSU .....	46
2.9.3	Transporte de residuos sólidos .....	47
2.9.4	Clasificación de tamaños y cribado .....	47
2.9.5	Separación de metales ferrosos.....	48
2.10	Incineración de residuos sólidos .....	48
2.10.1	Consideraciones de diseño del sitio.....	48
2.10.2	Recolección y entrega de desperdicios.....	49
2.10.3	Manejo y almacenamiento de desperdicios .....	49
2.10.4	Control de tamaño y recuperación.....	50
2.10.5	Sistemas de alimentación del incinerador .....	50
2.10.5.1	Sistemas de alimentación para recepción y almacenamiento de vaciado al piso 50	
2.10.5.2	Sistemas de alimentación para sistemas de recepción y almacenamiento de foso y grúas de combustión masiva.....	50
2.10.6	Aire de combustión.....	51
2.10.7	Eliminación y manipulación de cenizas .....	51

2.10.7.1	Propiedades de las cenizas .....	52
2.10.8	Control de la contaminación ambiental .....	52
2.10.8.1	Contaminación del aire.....	52
2.10.8.2	Contaminación del agua .....	54
2.10.8.3	Contaminación acústica.....	54
2.10.9	Instrumentación y control.....	54
2.10.10	Operación.....	55
2.10.11	Otros sistemas de incineración de desechos sólidos.....	55
2.11	Incineración de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos .....	56
2.11.1	Incineradores de Residuos Peligrosos biológico infecciosos .....	58
2.11.2	Sistemas de incineración .....	60
2.11.3	Controles ambientales .....	62
2.12	Aspectos de la contaminación del aire de los procesos de incineración.....	62
2.12.1	Material particulado.....	63
2.12.2	Tóxicos del aire .....	63
2.13	Control de la contaminación del aire para sistemas de incineración .....	64
2.13.1	Opciones de equipo para incinerador APC.....	64
2.13.1.1	Cámaras de sedimentación .....	64
2.13.1.2	Ciclones y colectores inerciales .....	64
2.13.1.3	Depuradores húmedos.....	65
2.13.1.4	Precipitadores electrostáticos .....	65
2.13.1.5	Filtro de tela (Cámara de filtros).....	66
2.14	Enfoques para la selección y diseño de incineradores .....	66
2.14.1	Caracterizar los residuos.....	67
2.14.2	Diseñar el sistema en bloques.....	67

2.14.3	Establecer objetivos de desempeño .....	67
2.14.4	Desarrollar equilibrios térmicos y materiales .....	67
2.14.5	Desarrollar la envolvente del incinerador.....	68
2.14.6	Evaluar la dinámica del incinerador .....	68
2.14.7	Desarrollar los diseños de equipos auxiliares.....	68
2.14.8	Desarrollar la economía del incinerador.....	68
2.14.9	Construir y operar .....	68
CAPÍTULO 3 CONCEPTUALIZACIÓN .....		69
3.1.1	Pregunta de investigación.....	69
3.1.2	Hipótesis .....	69
3.1.3	Objetivos.....	69
3.1.3.1	Objetivo general .....	69
3.1.3.2	Objetivos específicos.....	69
3.1.4	Justificación .....	69
CAPÍTULO 4 PLAN DE TRABAJO .....		71
4.1	Metodología .....	72
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....		73
5.1	Concepto de Análisis de ciclo de vida .....	73
5.2	Estructura de ACV según ISO .....	74
5.2.1	Definición de objetivo y alcance .....	75
5.2.2	Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV) .....	76
5.2.3	Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) .....	76
5.2.4	Interpretación.....	78
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ESTUDIO DE CASO: INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS BIOLÓGICO INFECCIOSOS .....		80

6.1	Proceso de incineración de RPBI en la planta incineradora en Oaxaca de Juárez .....	80
6.1.1	Balance de materia y energía.....	81
6.2	Generación de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos en México por sector salud público .....	83
6.3	FASE 1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE .....	86
6.3.1	Objetivo .....	86
6.3.2	Alcance .....	86
6.3.2.1	Unidad funcional y flujo de referencia.....	86
6.3.2.2	Descripción y límites del sistema.....	86
6.3.2.3	Criterios de cohorte y asignación para cada escenario.....	87
6.3.3	Metodología de la EICV y tipos de impacto .....	89
6.3.4	Tipos y fuentes de datos del inventario .....	89
6.4	FASE 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	90
6.4.1	Descripción de las etapas del ACV del proceso de incineración .....	90
6.4.1.1	Elaboración del horno incinerador .....	90
6.4.1.2	Transporte.....	92
6.4.1.3	Instalaciones de la planta incineradora.....	93
6.4.1.4	Fin de vida.....	94
6.4.2	Límites del sistema .....	94
6.4.3	Manufactura del horno incinerador .....	95
6.4.4	Transporte del horno incinerador .....	96
6.4.5	Transporte de RPBI .....	98
6.4.6	Uso (incineración de RPBI).....	99
6.4.7	Fin de vida .....	100
6.5	FASE 3: EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA .....	101

6.5.1	Clasificación del impacto ambiental de la gestión de RPBI.....	101
6.5.2	Caracterización del impacto ambiental global.....	101
6.5.3	Impacto ambiental de la gestión de RPBI por categoría .....	102
6.5.3.1	Cambio climático .....	102
6.5.3.2	Agotamiento de la capa de ozono .....	102
6.5.3.3	Acidificación terrestre.....	103
6.5.3.4	Eutrofización de agua fresca .....	104
6.5.3.5	Eutrofización marina.....	104
6.5.3.6	Toxicidad humana.....	105
6.5.3.7	Formación de oxidantes fotoquímicos .....	106
6.5.3.8	Formación de material particulado.....	106
6.5.3.9	Ecotoxicidad terrestre.....	107
6.5.3.10	Ecotoxicidad de agua fresca.....	108
6.5.3.11	Ecotoxicidad marina.....	108
6.5.3.12	Radiación ionizante.....	109
6.5.3.13	Ocupación de tierras agrícolas .....	110
6.5.3.14	Ocupación de suelo urbano .....	110
6.5.3.15	Transformación de suelo natural .....	111
6.5.3.16	Agotamiento de agua.....	112
6.5.3.17	Agotamiento de metales .....	112
6.5.3.18	Agotamiento de recursos fósiles .....	113
6.6	FASE 4: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	114
6.6.1	Identificación de impactos significativos en la etapa de uso (incineración de RPBI)	114
CAPÍTULO 7 MAPEO DE FLUJO DE VALOR .....		118

7.1	Desarrollo del mapeo de flujo de valor.....	118
7.1.1	Objetivo del VSM.....	119
7.1.2	Mapa del estado actual del sistema-producto.....	119
7.1.3	Mapa del estado futuro del sistema-producto.....	122
VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....		129
Hipótesis.....		129
Cumplimiento de objetivos .....		129
Objetivo general .....		129
Objetivos específicos.....		129
CONCLUSIONES.....		131
PERSPECTIVAS .....		132
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....		133
Bibliografía.....		136
ANEXOS .....		143
ANEXO I.....		143
ANEXO II.....		153

## Índice de tablas

Tabla 1.1	Capacidad total instalada de la infraestructura nacional de plantas incineradoras de RPBI .....	10
Tabla 1.2	Opciones tecnológicas para tratamiento de RPBI .....	13
Tabla 1.3.	Comparación de las metodologías de evaluación de impacto ambiental .....	20
Tabla 1.4.	Símbolos de VSM .....	27
Tabla 2.1	Temperaturas de combustión de referencia estándar para incineradores de desechos infecciosos .....	58
Tabla 2.2	Aplicabilidad de las tecnologías existentes al tratamiento de residuos peligrosos y biológico infecciosos .....	59

Tabla 2.3 Componentes de un incinerador de residuos infecciosos <sup>a</sup> .....	60
Tabla 6.1. Generación aproximada mensual de RPBI en México por Sector Salud Público Año 19-21 .....	84
Tabla 6.2. Fuentes de obtención para construir el ICV .....	89
Tabla 6.3. Inventario de ciclo de vida manufactura del horno .....	95
Tabla 6.4. Inventario de ciclo de vida transporte de horno incinerador .....	97
Tabla 6.5. Inventario de ciclo de vida transporte RPBI.....	99
Tabla 6.6. Composición promedio de los RPBI .....	99
Tabla 6.7. Inventario de ciclo de vida uso (incineración de RPBI).....	100
Tabla 6.8. Inventario de ciclo de vida de fin de vida.....	100
Tabla 6.9. Categorías de impactos significativas en la etapa de uso .....	115
Tabla 6.10. Comparación de resultados obtenidos en la categoría de cambio climático .....	116
Tabla 7.1. Comparación de equipos .....	122
Tabla 7.2 Datos del peso/gas .....	125
Tabla 7.3 Comparación de sistemas actual y de referencia .....	126
Tabla 7.4 Comparación de la contribución a Cambio Climático .....	127

## Índice de figuras

Figura 1.1. Clasificación de residuos .....	5
Figura 1.2. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida .....	19
Figura 1.3. Proceso del mapeo de flujo de valor .....	26
Figura 2.1. Triángulo de la combustión.....	35
Figura 2.2. Proceso de incineración.....	62
Figura 5.1. Marco de referencia ACV .....	75
Figura 6.1. Proceso de incineración de RPBI.....	81
Figura 6.2. Horno incinerador .....	82
Figura 6.3. Límites del sistema.....	86
Figura 6.4. Escenario de incineración de RPBI.....	88
Figura 6.5. Horno incinerador .....	90
Figura 6.6. Tabiques refractarios .....	91
Figura 6.7. Materiales .....	91

Figura 6.8. Torre de estación de lavado.....	92
Figura 6.9. Tablero de control .....	92
Figura 6.10. Transporte del horno .....	93
Figura 6.11. Cámara de refrigeración.....	93
Figura 6.12. Condensador.....	93
Figura 6.13. Evaporador .....	94
Figura 6.14. Biodigestor .....	94
Figura 6.15. Esquema general del sistema para el ACV de incineración de RPBI .....	95
Figura 6.16. Ruta de transporte del horno. Elaboración a partir de “Google Earth” .....	97
Figura 6.17. Ruta de transporte RPBI. Elaboración a partir de “Google Earth” .....	98
Figura 6.18. Impactos ambientales potenciales por etapa de ciclo de vida .....	101
Figura 6.19 Cambio climático .....	102
Figura 6.20 Agotamiento de la capa de ozono .....	103
Figura 6.21. Acidificación terrestre.....	103
Figura 6.22. Eutrofización de agua fresca .....	104
Figura 6.23. Eutrofización de agua marina.....	105
Figura 6.24. Toxicidad humana.....	105
Figura 6.25. Formación de oxidantes fotoquímicos .....	106
Figura 6.26. Formación de material particulado.....	107
Figura 6.27. Ecotoxicidad terrestre .....	107
Figura 6.28. Ecotoxicidad de agua fresca.....	108
Figura 6.29. Ecotoxicidad marina .....	109
Figura 6.30. Radiación ionizante.....	109
Figura 6.31. Ocupación de tierras agrícolas .....	110
Figura 6.32 Ocupación de suelo urbano .....	111
Figura 6.33. Transformación de tierra natural.....	111
Figura 6.34. Agotamiento de agua.....	112
Figura 6.35. Agotamiento de metales.....	113
Figura 6.36. Agotamiento de recursos fósiles .....	113
Figura 6.37. Potenciales impactos .....	114
Figura 7.1. Plano arquitectónico de la planta incineradora .....	118

Figura 7.2 Mapa del estado actual del sistema-producto.....	121
Figura 7.3 Mapa del estado futuro del sistema-producto .....	124
Figura 7.4 Equivalencias de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	128
Figura 0.1. Potenciales impactos .....	153

# INTRODUCCIÓN

El creciente aumento de la población podría generar un incremento en la generación de residuos peligrosos biológico infecciosos, provocando un problema ambiental y social, que es una cuestión de gran importancia. Los RPBI son generados en instalaciones que brindan atención médica y actividades relacionadas, estos son especificados en la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2003, donde también se especifica el tipo de tratamiento que se les aplica (PROFEPA, 2020).

Uno de los tratamientos para los RPBI es por medio de la incineración, siendo una de las tecnologías más utilizadas, ya que cumple con su principal propósito que es la disminución de residuos. Es una técnica que se ha utilizado en México desde finales de la década de 1970. Los primeros incineradores se instalaron en hospitales, universidades e institutos de investigación con el fin de cremar residuos patológicos o cadáveres (Rosas Domínguez, y otros, 2003). A pesar de esto es también una de las prácticas con mayores posibles impactos, ya que en el proceso de incineración se emiten diferentes contaminantes a la atmósfera trayendo algunos efectos negativos para el medio ambiente. Cabe señalar que las actividades relacionadas con la gestión y manejo de este tipo de residuos implican especial atención técnica, desde su generación, almacenamiento, transportación y tratamiento, así como su destino final, esta es la forma de asegurar los menores impactos negativos a la población en general y a los ecosistemas (León López, 2020). Muy probablemente la pandemia por COVID-19 esté provocando un aumento en la generación de RPBI, como consecuencia del aumento en el número de contagios. Esto podría ocasionar una saturación en plantas de incineración o un exagerado consumo de recursos energéticos para poder tratar estos desechos.

Debido a esto se pretende identificar los *hotspots* en el proceso de incineración, esto mediante la combinación de un Análisis de Ciclo de Vida y *Lean*; que son dos tipos de metodología que permiten identificar los diferentes impactos ambientales y mejorar el proceso de incineración, de tal manera que el impacto ambiental disminuya. Con esto se pretende realizar una propuesta para dar solución a los diferentes impactos resultados de la incineración de los RPBI.

# CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

---

## 1.1 Residuos

Debido a diferentes factores la generación de residuos ha ido en aumento en los últimos años, lo que ha provocado que se empleen técnicas para la disminución y manejo de estos. A esta acelerada y gigantesca producción de residuos han contribuido el aumento poblacional, su creciente urbanización (actualmente más de la mitad de la población mundial vive en ciudades), el desarrollo industrial, los cambios tecnológicos y la modificación en los patrones de consumo de la población (González Vivanco, Ayala Islas, & Vargas Pellicer, 2015).

De esta manera, la gestión integral de los residuos, además de procurar reducir su generación y conseguir su adecuada disposición final, también puede dar como resultado colateral la reducción, tanto de la extracción de recursos (evitando su agotamiento), como de la energía y el agua que se utilizan para producirlos, así como la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Los residuos se definen formalmente como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

De acuerdo con la Figura 1.1, los residuos se dividen con respecto a sus orígenes y sus características. Estos se dividen en tres grupos, residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos. Con respecto a los residuos peligrosos, estos tienen una clasificación más definida, de la cual se desprenden los residuos peligrosos biológico infecciosos.

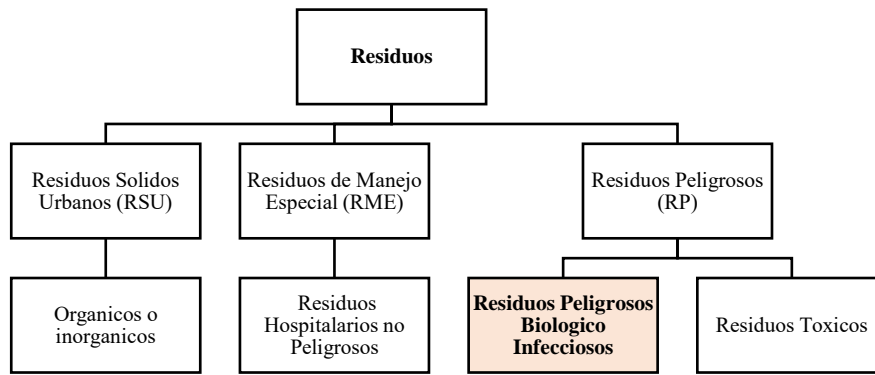


Figura 1.1. Clasificación de residuos

Fuente: elaboración propia en base a las Normas Oficiales Mexicanas

### 1.1.1 Residuos peligrosos

Los residuos peligrosos, en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológico-infecciosas, y por su forma de manejo pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general, por lo que es necesario determinar los criterios, procedimientos, características y listados que los identifiquen (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005).

Los avances científicos y tecnológicos y la experiencia internacional sobre la caracterización de los residuos peligrosos han permitido definir como constituyentes tóxicos ambientales, agudos y crónicos a aquellas sustancias químicas que son capaces de producir efectos adversos a la salud o al ambiente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005).

### 1.1.2 Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos

Los Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI) son aquellos materiales generados durante los servicios de atención médica que contengan agentes biológico-infecciosos, y que puedan causar efectos nocivos a la salud y al ambiente. Para que un microorganismo sea un agente Biológico Infeccioso debe de estar en una concentración suficiente (inóculo), en un ambiente propicio (supervivencia), en presencia de una vía de entrada, y en un hospedero susceptible (DOF, 2003).

Los establecimientos generadores de RPBI se clasifican en tres niveles de acuerdo a lo siguiente:

- Nivel I: Unidades hospitalarias de 1 a 5 camas e instituciones de investigación con excepción de los señalados en el Nivel III. Laboratorios clínicos y bancos de sangre que realicen análisis de 1 a 5 muestras al día. Unidades hospitalarias psiquiátricas y centros de toma de muestras para análisis clínicos.
- Nivel II: Unidades hospitalarias de 6 a 60 camas. Laboratorios clínicos y bancos de sangre que realicen análisis de 51 a 200 muestras al día. Bioterios que se dediquen a la investigación con agentes biológico-infecciosos, o establecimientos que generen de 25 a 100 kilogramos al mes de RPBI.
- Nivel III: Unidades hospitalarias de más de 60 camas, centros de producción e investigación experimental en enfermedades infecciosas. Laboratorios clínicos y bancos de sangre que realicen análisis de 200 muestras al día, o establecimientos que generen más de 100 kilogramos al mes de RPBI (DOF, 2003).

Los RPBI sólidos o líquidos deberán estar contenidos en recipientes de material sólido o bolsas identificadas por colores y depositadas inmediatamente después de que se generen. Los residuos serán almacenados (algunos requieren de refrigeración) temporalmente y recolectados, para su tratamiento interno o externo a través de empresas o prestadores de servicios dedicados a esta actividad (Morelos Ramírez, Ramírez Pérez, Sánchez Dorantes, Chavarín Rivera, & Meléndez Herrada, 2014).

Los RPBI tienen gran importancia por los posibles riesgos que representan cuando su manejo resulta inadecuado. Incluyen a los que se producen en instalaciones que brindan servicios de atención a la salud y actividades relacionadas, y están compuestos por residuos no anatómicos, cultivos y cepas de microorganismos, objetos punzocortantes, muestras patológicas y sangre (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

### **1.1.3 Infraestructura instalada para el manejo de RPBI en México**

Los residuos peligrosos biológico infecciosos deben ser tratados por métodos físicos o químicos que garanticen la eliminación de los patógenos y deben hacerse irreconocibles para su disposición final en los sitios autorizados. Los residuos patológicos deben de ser incinerados o inhumados, excepto aquellos que estén destinados a fines terapéuticos y de investigación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

La información sobre los Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos (RPBI) se analiza de forma independiente, ya que cuentan con infraestructura propia para su manejo; esta se organiza en tres aspectos: 1. Tratamiento de Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos in situ, 2. Tratamiento de Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos ex situ y 3. Incineración de Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

La primera decisión importante es dónde tratar los desechos infecciosos. Hay dos opciones básicas:

- La opción in situ proporciona tratamiento en el sitio, es decir, en la instalación donde se generaron los desechos infecciosos. Con el objetivo de disminuir el riesgo de exposición a los agentes biológico infecciosos (SEMARNAT y SSA, 2007).
- Con la opción fuera del sitio, los desechos infecciosos se tratan en otro lugar, y los desechos no tratados se transportan fuera del sitio (es decir, lejos de la instalación donde se generaron los desechos).

### **Tratamiento de RPBI in situ**

En el país existen seis empresas autorizadas en el rubro de tratamiento de RPBI in situ, con una capacidad total instalada, vigente al 15 de febrero del 2019, de 178,331.75 toneladas aproximadamente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

El primer requisito previo para la opción de tratamiento in situ es la disponibilidad de equipos de tratamiento adecuados. El equipo disponible debe poder tratar los residuos infecciosos que se generan en su institución. La capacidad debe ser suficiente para tratar las cantidades de desechos generados. El tratamiento y el equipo deben cumplir con todos los requisitos reglamentarios (Reinhardt & Gordon, 2018).

Si el equipo aún no está en su lugar, puede haber limitaciones físicas, reglamentarias e institucionales que impidan la instalación de dicho equipo. Las limitaciones físicas se encuentran con frecuencia cuando un hospital quiere construir un incinerador; simplemente no hay suficiente espacio en los terrenos del hospital para tal construcción. Las restricciones regulatorias determinan lo que es factible desde la perspectiva de los requisitos regulatorios, es

decir, aquellos que pertenecen a los permisos, el tratamiento de residuos y los impactos ambientales de los diferentes procesos de tratamiento (Reinhardt & Gordon, 2018).

El tratamiento de desechos infecciosos in situ tiene varias ventajas. Muchos generadores de desechos infecciosos prefieren la opción de tratamiento en el sitio porque les da un control total sobre los desechos. Prefieren tratar los desechos en el sitio que arriesgarse a una posible responsabilidad al dejar la instalación sin tratar. Otra ventaja es un mejor control de costos, porque el generador no está sujeto a la política de precios de un proveedor comercial. Además, el tratamiento in situ mediante incineración brinda la oportunidad de recuperación de calor, un beneficio adicional en términos de costos.

El tratamiento in situ tiene varias desventajas. Cuando elige tratar los desechos en el sitio, participa en una actividad que no es la función principal de su organización (como brindar atención médica o realizar investigaciones). Los fondos deben gastarse en equipos y operaciones de tratamiento. El generador es responsable de cumplir con todos los requisitos reglamentarios, lo que implica mantenerse actualizado con todas las reglamentaciones nuevas y cambiantes, a menudo una tarea difícil y que requiere mucho tiempo (Reinhardt & Gordon, 2018).

### **Tratamiento de RPBI ex situ**

En el país existen 32 empresas autorizadas para el tratamiento de RPBI ex situ con una capacidad total instalada, vigente al 15 de febrero del 2019, de 215,321.84 toneladas aproximadamente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

El tratamiento ex situ tiene algunas ventajas. El uso de la opción de tratamiento fuera del sitio le permite concentrar sus esfuerzos en sus funciones principales. Su preocupación por los desechos infecciosos se limitará a que un proveedor confiable los empaque y recoja adecuadamente para su tratamiento fuera del sitio. La instalación de tratamiento fuera del sitio debe utilizar equipo de tratamiento moderno y eficaz, debe conocer y cumplir con todos los requisitos reglamentarios, y debe tener un programa de control de calidad y garantía de calidad eficaz (Reinhardt & Gordon, 2018).

El tratamiento ex situ cuenta con algunas desventajas. La pérdida de control sobre el destino de sus desechos se mencionó anteriormente. Tal pérdida de control puede significar una mayor responsabilidad. Debe asegurarse de que la instalación de tratamiento fuera del sitio esté

funcionando de acuerdo con todas las reglamentaciones pertinentes; si no es así, puede ser responsable. También puede estar sujeto a requisitos reglamentarios adicionales porque, según las reglamentaciones de rastreo de desechos médicos, los generadores deben rastrear todos los desechos infecciosos que dejan las instalaciones sin tratar (Reinhardt & Gordon, 2018).

La persona física o moral que desee ser prestador de servicio de tratamiento in situ o ex situ de residuos peligrosos, deberá presentar el trámite SEMARNAT-07-033-D a través del formato FF-SEMARNAT-038. Y deberá presentar los siguientes documentos: autorización de uso de suelo para la actividad solicitada expedida por la autoridad competente, plano del proyecto ejecutivo de la planta en conjunto, diagrama de flujo del proceso, programa de capacitación del personal involucrado en el manejo, programa de prevención y atención de contingencias o emergencias ambientales y accidentes, balance de materia y energía, autorización en materia de impacto ambiental, propuesta de póliza de seguro o garantía financiera, la propuesta de protocolo de pruebas para procesos innovadores, memoria fotográfica de las instalaciones y equipo y comprobante de pago de derechos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015).

### **Incineración de RPBI**

De acuerdo a la Tabla 1.1, a nivel nacional hay 19 empresas autorizadas para la incineración de RPBI, con una capacidad total instalada, de 117,519.96 toneladas por año aproximadamente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Tabla 1.1 Capacidad total instalada de la infraestructura nacional de plantas incineradoras de RPBI

	Empresa	Dirección	Municipio	Clave Mpio.	Estado	Clave Entidad	Tipo de residuo	Vigencia inicio	Vigencia término	Capacidad instalada (Ton/año)
1	Ameq de México, SA de C.V.	Carretera a Los Pinos km 2, C.P. 25900	Ramos Arizpe	27	Coahuila	5	Biológico Infecciosos (Patológicos)	31/12/2001	Indefinida	329.96
2	Planta incineradora de residuos biológico-infecciosos, SA de CV	4a Fracción de San Antonio Espinoza, C.P. 38110	Celaya	7	Guanajuato	11	Residuos peligrosos biológico infecciosos patológicos, Residuos de Síntesis Orgánica, Residuos Minerales Líquidos y Lodos de Tratamientos Químicos.	13/03/2020	13/03/2030	6,132.00
3	Solam, SA de CV	Km 7.4 de la Carretera Federal Guadalajara-Colotlán, Colonia Tesistán, C.P. 45200, eduardo@solam.mx	Zapopan	120	Jalisco	14	Biológico Infecciosos	19/05/2017	19/05/2027	2,400.00
4	Bio-tratamientos México, SA de CV	Manzana B Lotes 12 y 13, Parque Industrial Lerma	Lerma	51	México	15	Biológico Infecciosos Industriales	19/12/2001	Indefinida	3,066.00
5	Recolectora y tratadora Garbage, SA de CV	Av. del Venado No. 26, Lote 24, Manzana 1, Col. Parque Industrial Tenango del Valle, C.P. 52300	Tenango del Valle	90	México	15	Biológico Infecciosos (Patológicos)	21/08/2018	21/08/2028	262
6	Ingeniería Ambiental Integral SA de CV	km 7 Carretera Isidro Fabela, Pasaje San Isidro Fabela, Comunidad El Cerrillo	Lerma	51	México	15	Residuos biológico infecciosos patológicos, medicamentos caducos	24/02/2020	24/02/2030	6,300.00
7	Centro Nacional de Servicios de Diagnóstico en Salud Animal (CENASA)/SEN ASICA/SAGARP A	Carretera Federal México-Pachuca Km. 37.5, cenasa@prodigy.net.mx	Tecámac	81	México	15	Patológicos (cadáveres y partes de animales de ganado porcino, ovino, caprino, bovino, equino, aves y caninos. Cultivos	17/02/2017	17/02/2027	40

							y cepas de agentes biológico infecciosos, sangre.			
8	Actium Tratamiento Ecológico de Residuos, S.A. de C.V.	Carretera Federal México-Pachuca Km. 22.5, Col. El Cerrito 2da. Sección Progreso	Atotonilco de Tula	13	Hidalgo	13	Biológico Infecciosos y Medicamentos caducos o fuera de especificaciones	12/05/2017	12/05/2027	1,700.00
9	Centro Nacional De Servicios De Constatación De Salud Animal (CENAPA) / SENASICA / SAGARPA	Carretera Federal Cuernavaca-Cuautla No. 8534, Col. Progreso, 62550, cenapa@senasica.sagarpa.mx	Jiutepec	4	Morelos	17	Patológicos (cadáveres y partes de animales de ganado porcino, ovino, caprino, bovino, equino, aves y caninos.	17/02/2017	17/02/2027	40
10	Bio Fast and Clean, SA de CV	Fama, No. 407, Col. El Milagro, C.P. 66634	Apodaca		Nuevo León	19	Biológico Infecciosos	10/05/2019	10/05/2029	624
11	Veolia Residuos del Norte, S.A. de C.V.	Lote 3 Manzana 4 Zona 5, del Poblado de San Nicolás de los Garza, C.P. 65500, jose-lucio@veolia.com	Salinas Victoria	45	Nuevo León	19	Biológico Infecciosos	22/09/2017	22/09/2027	3,066.00
12	Técnicas Especiales de Reducción de Altamira, SA de CV	Av. Hidalgo No. 3705-203, Col. Guadalupe	Altamira	3	Tamaulipas	28	Biológico Infecciosos Industriales	13/02/2002	Indefinida	70,000.00
13	Marco Antonio Thomas Campuzano	Calle Tres Norte, Lote 15 Manzana A, Parque Industrial Puerto Chiapas	Tapachula	89	Chiapas	7	Biológico Infecciosos	29/11/2013	29/11/2023	624
14	Logística y Comercialización JB, S.A. de C.V.	Av. Central Poniente No. 694, Col. Terán, C.P. 29050	Tuxtla Gutiérrez	101	Chiapas	7	Residuos peligrosos biológico infecciosos y medicamentos caducos líquidos y sólidos	13/06/2019	13/06/2029	4689
15	Medam, S de RL de CV	Periférico Poniente Tablaje Catastral no. 12741 a 500 m de carretera el Causel 97300	Mérida	50	Yucatán	31	Biológico Infecciosos	16/04/2014	16/04/2024	788.4
16	Ecoresiduos, Desechos y	Calle 9 Sur No. 30, Sector Sur, 33000,	Delicias	21	Chihuahua	8	Biológico Infecciosos tales como; Patológicos;	19/03/2014	19/03/2024	86.4

	Reciclados, SA de CV.	eliaseliasconn@gmail.com					No anatómicos; Punzocortantes			
17	Everardo García Osuna	Río Bravo No. 210, Col. Ferrocarrilera, 82013, controlsanitariodelpacifico@gmail.com	Mazatlán	12	Sinaloa	25	Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos	24/06/2015	24/06/2025	97.2
18	Comercializadora Ecológica de Occidente, S.A. de C.V.	Blvd. Jesús Kumate No. 7490 Sur, Ejido Bachilahuato, 80189, comesapublico@gmail.com	Culiacán de Rosales	6	Sinaloa	25	Agentes mordientes gastados residuales; residuos de adhesivos y polímeros; residuos de agentes enlazantes y de carbonización; Aminas gastadas, filtros de amina contaminada, lodos de amina, productos de la degradación de la amina, así como sólidos recuperados (fondos) provenientes del proceso de endulzamiento del gas y condensados amargos.	19/04/2017	19/04/2027	15500
19	Incizac, S.A de C.V.	Carretera a Cd. Cuauhtémoc Km. 4+600, Col. Cieneguitas, 98658, incizacsadecv@gmail.com	Guadalupe	17	Zacatecas	32	Biológico Infecciosos y Medicamentos caducos	22/03/2017	22/03/2027	1775
									<b>TOTAL =</b>	<b>117519.96</b>

Fuente: SEMARNAT, 2020

#### 1.1.4 Opciones tecnológicas para tratamiento de RPBI.

Existen diferentes opciones tecnológicas para tratar los residuos biológico infecciosos, entre las que se encuentran la incineración, esterilización, desinfección química y desinfección con microondas (SEMARNAT y SSA, 2007).

Tabla 1.2 Opciones tecnológicas para tratamiento de RPBI

<b>Tecnología</b>	<b>Consiste</b>
<b>Desinfección Química.</b>	Consiste en la destrucción de agentes biológico infecciosos a excepción de las esporas de hongos y bacterias que suelen ser resistentes a este método, mediante la aplicación de sustancias químicas que actúan sobre la vida o desarrollo de los agentes biológico infecciosos.
<b>Desinfección con microondas.</b>	Tratamiento en el que se aplica radiación electromagnética de corta longitud de onda a una frecuencia característica. La energía irradiada a dicha frecuencia afecta exclusivamente a las moléculas de agua que contiene la materia orgánica, provocando cambio en sus niveles de energía manifestados a través de oscilaciones a alta frecuencia, las moléculas de agua al chocar entre sí friccionan y producen calor elevando la temperatura del agua contenida en la materia, causando la desinfección de los RPBI.
<b>Esterilización.</b>	Tratamiento para la destrucción de los agentes biológico infecciosos, sean cuales sean sus características, siendo lo mismo que sean patógenos o no, que estén sobre el material o dentro de él.  <i>Calor húmedo.</i> Se lleva a cabo mediante la utilización de vapor, que por sí solo no es esterilizante, por lo que requiere someterlo a una presión mayor que la atmosférica que aumente su temperatura, en un tiempo determinado, siendo de esta forma como se logra la destrucción de todos los agentes biológico infecciosos, los parámetros de esterilización dependen de las características y condiciones de los equipos que se utilicen.

<b>Incineración.</b>	Proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en el cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. Es el método de eliminación definitiva más efectivo ya que, puede reducir hasta el 90% del volumen y el 75% del peso y consigue una eliminación adecuada.
----------------------	---

Fuente: Elaboración propia en base a SEMARNAT y SSA, 2007.

En la siguiente sección se describe a detalle la incineración, ya que es una de las tecnologías de tratamiento de RPBI más utilizadas.

## 1.2 Incineración

Uno de los medios más eficaces para tratar muchos desechos, reducir su potencial dañino y, a menudo, convertirlos en una forma de energía, es la incineración. Al comparar la incineración con otras opciones de eliminación, tiene algunas ventajas como reducir el volumen y peso de los residuos a una fracción de su tamaño original, la reducción de los desechos es inmediata, las descargas de aire se pueden controlar eficazmente, entre otras (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

La primera función de la incineración consiste en transformar, por medio de una reacción química de oxidación lo más completa posible, a alta temperatura, los desechos heterogéneos, en unos residuos lo más inertes posibles, generando la mínima contaminación posible (Castells, 2012).

La combustión se define como una oxidación rápida de la materia combustible con desprendimiento de calor. Así pues, se precisa en primera instancia, que el residuo a oxidar tenga, al menos, uno de los tres únicos elementos susceptibles de combinarse con el oxígeno liberado de calor: C (carbono), H (hidrógeno) y S (azufre), (Castells, 2012).

Existe una amplia variedad de incineradores que se han desarrollado para la quema de los diversos tipos y cantidades de desechos que se encuentran en la sociedad actual. Se han desarrollado incineradores especiales para desechos radiactivos, unidades listas para usar para

desechos de hospitales o casas de apartamentos, equipos de incineración para quemar desechos domésticos comunes, incineradores industriales para la destrucción de desechos líquidos, etc. Algunos de estos incineradores tienen equipos de recuperación de calor que generan vapor, agua caliente o aire caliente, y algunos no hacen más que quemar sus corrientes de desechos designadas. Hay incineradores que son versátiles en su aplicación, capaces de quemar cualquier cosa, desde gas residual hasta basura, alquitrán y residuos a través del agua, todo dentro de una unidad (Brunner, 1987).

Para muchos desechos, la combustión (incineración) es un elemento atractivo o necesario de la gestión de desechos. Ocasionalmente, en lo que respecta a la incineración de humos o líquidos o sólidos esencialmente libres de cenizas, los procesos de combustión pueden denominarse con propiedad eliminación. Para la mayoría de los sólidos y muchos líquidos, la incineración es solo un paso de procesamiento. Quedan residuos líquidos o sólidos para su posterior eliminación (Niessen, 2002).

Estas son algunas de las ventajas potenciales que la incineración de desechos ofrece:

1. Reducción de volumen: importante para sólidos voluminosos o desechos con un alto contenido de combustible y/o humedad.
2. Mitigación del impacto ambiental: especialmente para materiales orgánicos que se filtrarían de los rellenos sanitarios o crearían molestias por olores. Además, el impacto del “gas de efecto invernadero” de CO<sub>2</sub> generado en la incineración de residuos sólidos es menor que el del metano (CH<sub>4</sub>) y el CO<sub>2</sub> generados en las operaciones de vertido.
3. Recuperación de energía: importante cuando se dispone de grandes cantidades de desechos y se encuentran cerca mercados confiables para los subproductos de combustible, vapor o electricidad.
4. Estabilización en rellenos sanitarios: la biodegradación de material orgánico en un relleno sanitario conduce al hundimiento y la formación de gas que altera las estructuras de recubrimiento celular. La destrucción de la materia orgánica residual elimina este problema. La incineración también forma óxidos o residuos sinterizados vítreos que son insolubles (no lixiviantes).
5. Saneamiento: destrucción de organismos patógenos que representen un peligro para la salud pública (Niessen, 2002).

Los sistemas de incineración para desechos peligrosos son significativamente diferentes a sus contrapartes para desechos no peligrosos. Sin embargo, las diferencias no se encuentran en el tipo básico de tecnología de combustión o el sistema asociado de control de la contaminación del aire, sino en los sistemas de recepción y alimentación de desechos, los sistemas de instrumentación y control, y el diseño intenso y la atención operativa prestada al logro continuo y confiable de rendimiento: el agotamiento de la materia prima, la reducción de las emisiones atmosféricas y la eliminación segura de los residuos (Niessen, 2002).

### **1.3 Metodologías de análisis de impacto ambiental**

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, ha aumentado el interés por el desarrollo de diferentes metodologías, con el fin de evaluar los impactos ambientales. La literatura reporta métodos de listas de verificación, redes de interacciones, métodos de matrices, métodos de superposición, métodos Ad Hoc, simulación y predicción, análisis del ciclo de vida, entre otras (Viloria Villegas, Cadavid, & Award, 2018).

#### **1.3.1 Métodos de listas de verificación**

Es un método muy simple, por lo que es de uso frecuente. Se utiliza normalmente para una evaluación preliminar o para llamar la atención sobre impactos importantes. Hay muchas variedades de listas de chequeo. Típicamente, la lista de chequeo contiene una serie de puntos, asuntos de impacto o cuestiones que el usuario atenderá o contestará como parte del estudio de impacto. Tales listas de chequeo representan recordatorios útiles para identificar impactos y proporcionar una base sistemática y reproducible para el proceso de EIA. Pueden clasificarse en cuatro tipos:

- Simples: Analizan factores o parámetros sin ser estos valorados o interpretados.
- Descriptivas: Analizan factores o parámetros y presentan la información referida a los efectos sobre el medio.
- De verificación y escala: Incluyen, además de lo anterior, una escala de carácter subjetivo para la valoración de los efectos ambientales.
- De verificación, escala y ponderación: Añaden a las anteriores unas relaciones de ponderación de factores en la escala de valoración (Soriano Parra, Ruiz Rivera, & Ruiz Lizama, 2015).

### **1.3.2 Métodos de matrices**

Los métodos matriciales son técnicas bidimensionales que relacionan acciones con factores ambientales; y son básicamente de identificación. Los métodos matriciales, también denominados matrices interactivas causa-efecto, fueron los primeros en ser desarrollados para la EIA. La modalidad más simple de estas matrices muestra las acciones del proyecto en un eje y los factores del medio a lo largo del otro. Cuando se prevé que una actividad va a incidir en un factor ambiental, éste se señala en la celda de cruce, describiéndose en términos de su magnitud e importancia. Representan métodos ampliamente usados en los procesos de EIA, puesto que han sido diseñados para ser aplicados a cualquier tipo de proyectos, por lo que son muy populares (Soriano Parra, Ruiz Rivera, & Ruiz Lizama, 2015).

### **1.3.3 Métodos de redes**

El método de redes, también conocido como “Árbol de impacto”, es un método que introduce una secuencia de causa y efecto calificando al impacto como primario, secundario o terciario, fraccionando los impactos y posibilita la evaluación del impacto acumulado, siempre y cuando se tome en consideración el grado de importancia y dimensión de la probabilidad de ocurrencia del impacto (Yáñez Vargas, 2008).

### **1.3.4 Métodos de superposición**

Los métodos de superposición implican la preparación de un conjunto de mapas transparentes, que representan la distribución espacial de una característica ambiental (por ejemplo, extensión del área de bosque denso). Se recopilará información sobre una amplia gama de variables para las unidades geográficas estándar dentro del área de estudio, que se registrará en una serie de mapas, normalmente uno para cada variable. Estos mapas se superpondrán para producir una figura compuesta. Los mapas compuestos resultantes caracterizan el área física, social y ecológica, uso de la tierra y otras características relevantes relativas a la ubicación del desarrollo propuesto (Anjaneyulu & Manickam, 2007).

### **1.3.5 Métodos Ad Hoc**

Básicamente, los métodos ad hoc indican amplias áreas de posibles impactos al enumerar parámetros ambientales compuestos (por ejemplo, flora y fauna) que probablemente se verán afectados por cualquier desarrollo. Los métodos ad hoc implican la formación de un equipo de

especialistas para identificar los impactos en su área de especialización. En este método, cada área ambiental, como aire y agua, se toma por separado y se considera la naturaleza de los impactos, tales como, a corto o largo plazo, reversibles o irreversibles. Los métodos ad hoc son para una evaluación aproximada del impacto total dando las áreas amplias de posibles impactos y la naturaleza general de estos posibles impactos. Por ejemplo, los impactos en la vida animal y vegetal se pueden declarar como significativos pero beneficiosos (Anjaneyulu & Manickam, 2007).

### **1.3.6 Talleres de modelado de simulación (simulación y predicción)**

Los analistas de sistemas han desarrollado un enfoque para la evaluación y gestión del impacto ambiental comúnmente conocido como Evaluación y Gestión Ambiental Adaptativa (AEAM), que combina varios modelos de simulación para predecir impactos. Este enfoque amplía el potencial de los modelos de simulación para evaluar los impactos de las alternativas y es beneficioso para la planificación de proyectos. El enfoque AEAM utiliza pequeños equipos interdisciplinarios que interactúan a través de talleres de modelado durante un tiempo relativamente corto para predecir impactos y evaluar alternativas, incluidas las medidas de gestión (Anjaneyulu & Manickam, 2007).

### **1.3.7 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

En la parte introductoria de la norma internacional ISO 14040 que sirve como marco, el ACV se ha definido de la siguiente manera:

El ACV estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto (es decir, de la cuna a la tumba) desde la adquisición de la materia prima hasta la producción, el uso y la eliminación. Las categorías generales de impactos ambientales que deben considerarse incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas.

Hay cuatro fases en un estudio de ACV (Figura 1.2):

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis de inventario
- Evaluación de impacto del ciclo de vida
- Interpretación

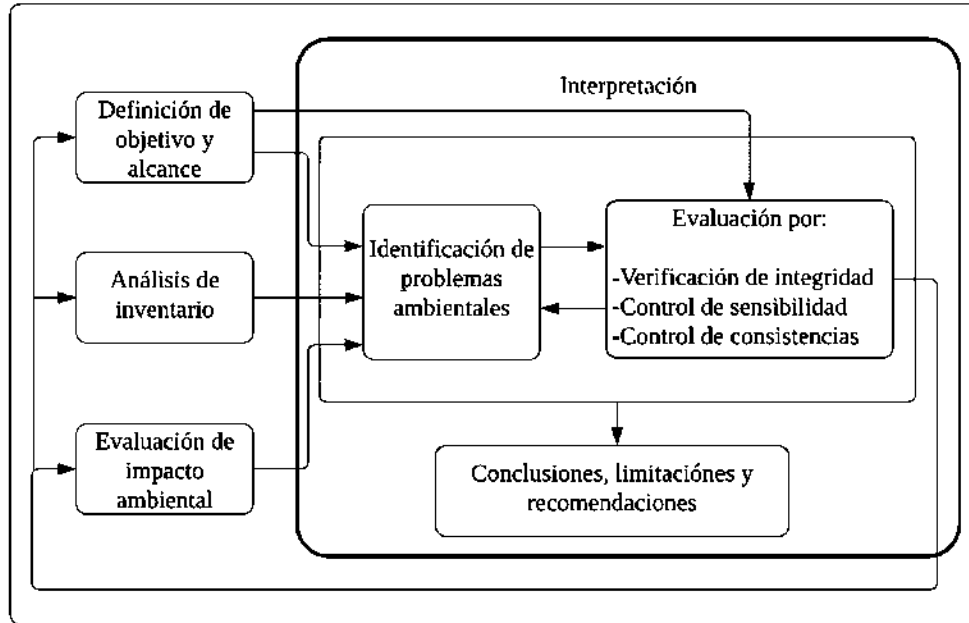


Figura 1.2. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida

Fuente: ISO 14044, 2006

Las organizaciones consideran benéfico conocer, con el mayor detalle posible, los efectos (aunque sean involuntarios) que sus productos, servicios o actividades podrían causar en el medio ambiente; en especial, los que provoquen impactos ambientales significativos adversos, para atender a las responsabilidades legales, sociales y políticas que ellos implican, además de las pérdidas económicas y de imagen empresarial (Romero Rodríguez, 2003).

El ACV, realizado de acuerdo con los procedimientos estipulados en la serie de normas ISO 14040, es una herramienta de gestión ambiental que brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre la utilización de un servicio, el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental y que sigan realizando igualmente la función para la que fueron programados (Romero Rodríguez, 2003).

El ACV no sólo es un instrumento para proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales, sino un instrumento empresarial para reducir costos y mejorar posiciones en el

mercado, ya sea que se emplee sola o conjuntamente con otras herramientas tales como la evaluación del riesgo y la evaluación del impacto ambiental (Romero Rodríguez, 2003).

### 1.3.8 Comparación de las metodologías de evaluación de impacto ambiental

Tabla 1.3. Comparación de las metodologías de evaluación de impacto ambiental

Metodología	Ventajas	Desventajas
<b>Métodos de listas de verificación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Proporcionan un medio de comunicación y un lugar para registrar los datos para su uso en referencias futuras.</li> <li>-Ofrecen cubrimiento o identificación de casi todas las áreas de impacto.</li> <li>-Obliga a pensar en forma sistemática en el conjunto de impactos que se pueden producir.</li> <li>-Permite un resumen conciso de sus efectos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Son demasiado generales o incompletos.</li> <li>-No ilustran las interacciones entre los efectos.</li> <li>-La cantidad de categorías que se revisarán puede ser inmensa, lo que creará confusión sobre impactos significativos.</li> <li>-Implica la identificación de efectos cualitativos y subjetivos.</li> <li>-El mismo efecto se puede registrar en varios lugares bajo encabezamientos diferentes.</li> </ul>
<b>Métodos de matrices</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Proporcionan relaciones de causa-efecto entre las diversas actividades del proyecto y sus impactos en los numerosos sectores o componentes de importancia ambiental.</li> <li>-Proporcionan una herramienta gráfica para mostrar los impactos a su audiencia de una manera que se puede comprender fácilmente.</li> <li>-Requiere pocos medios para aplicarla.</li> <li>-Acertada identificación de efectos por amplitud de factores.</li> <li>-Puede ajustarse a las particularidades de cada proyecto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requieren una gran cantidad de información sobre los componentes ambientales y las actividades del proyecto.</li> <li>-A través del proceso de agregación inherente, la toma de decisiones es, en efecto, apartada de las manos de quienes toman las decisiones y del público interesado.</li> <li>-No existen criterios únicos de valoración.</li> </ul>
<b>Métodos de redes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilidad para detectar impactos indirectos o secundarios.</li> <li>-Identifica interacciones entre proyectos complejos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No proporciona criterios para decidir la importancia de los impactos.</li> </ul>

			-Si la red es muy amplia, genera confusión y dificultad en el manejo de la información.
<b>Métodos de superposición</b>	<b>de</b>	<p>-Son autolimitantes porque existe un límite práctico en el número de transparencias que se pueden superponer.</p> <p>-Son útiles cuando se abordan cuestiones de selección de sitios y rutas.</p> <p>-Proporcionan un modo adecuado y eficaz de presentación y exhibición a sus audiencias.</p>	<p>-El análisis de superposición no puede ser el único criterio para la evaluación del impacto ambiental.</p> <p>-No existe ninguna disposición para la cuantificación y medición de los impactos ni se asegura que se cubrirán todos los impactos.</p> <p>-Las consideraciones son puramente espaciales, las consideraciones temporales están fuera de su alcance.</p> <p>-Los aspectos sociales, humanos y económicos no reciben ninguna consideración.</p> <p>-No se pueden identificar impactos de orden superior.</p>
<b>Métodos Hoc</b>	<b>Ad</b>	<p>-Son muy simples, se pueden realizar sin ningún tipo de formación.</p> <p>-Proporciona una guía mínima para el análisis de impacto al tiempo que sugiere amplias áreas de posibles impactos.</p>	<p>-No ofrece ninguna garantía de que abarque un conjunto completo de todos los impactos relevantes.</p> <p>-Carece de coherencia en el análisis, ya que puede seleccionar diferentes criterios para evaluar diferentes grupos de factores.</p> <p>-Es inherentemente ineficiente, ya que requiere un esfuerzo considerable para identificar y armar un panel apropiado para cada evaluación.</p>
<b>Métodos de simulación y predicción</b>	<b>de y</b>	<p>-Supera en gran medida las deficiencias de la mayoría de los otros métodos en el sentido de que otros métodos asumen condiciones invariables o impactos del proyecto en un solo marco de tiempo en</p>	<p>-La técnica puede llevar mucho tiempo y puede imponer una gran carga a los recursos monetarios.</p> <p>-Se encuentran todavía en una etapa embrionaria de desarrollo y aún no se ha demostrado su precisión y capacidad predictiva.</p>

	condiciones ambientales descritas estadísticamente. -Puede manejar impactos de orden superior e interacciones entre impactos.	-Requiere la participación de personas capacitadas en su uso y funciones.
<b>Análisis de ciclo de vida</b>	-Permite conocer, con el mayor detalle posible, los efectos que los productos, servicios o actividades podrían causar en el medio ambiente. -Brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes. -Es útil para bajar los costos en la medida que el nuevo diseño y los nuevos procesos de fabricación, transporte y distribución, entre otros, promuevan una mayor eficiencia en la asignación y el empleo de materias primas, insumos y energía. -Provee ventajas comparativas y competitivas al proporcionar todos los elementos de análisis a las empresas que más tarde deseen certificar sus productos bajo esquemas de sellos ambientales o etiquetas ecológicas.	-No puede abordar los impactos localizados. -No proporciona el marco para un estudio de evaluación de riesgos local completo, que identifique qué impactos se pueden esperar debido al funcionamiento de una instalación en una localidad específica. -Se centra en los aspectos medioambientales de los productos y no dice nada sobre sus características económicas, sociales y de otro tipo. -Limitación en la disponibilidad de datos.

Fuente: Elaboración propia en base a Anjaneyulu & Manickman 2007, Guinee 2004, Romero Rodríguez 2003.

#### 1.4 Métodos de mejora continua

La mejora continua puede definirse como pequeños cambios incrementales en los procesos productivos o en las prácticas de trabajo que permiten mejorar algún indicador de rendimiento, que no necesitan grandes inversiones para realizarse y que cuentan con la implicación de todos

los componentes de la empresa. Los temas con más frecuencia analizados, son la mejora de la calidad o costos de fabricación, aunque también son habituales los asuntos de seguridad e higiene en el trabajo (Marin Garcia, 2008).

El origen del concepto *Lean Manufacturing* puede ser remontado a Japón décadas atrás, y en particular, a *Toyota Motor Corporation*, e inicialmente fue conocido como Sistema de Producción Toyota y representa un modelo de organización y gestión de procesos de fabricación, que persigue la eficiencia en la fabricación de sus productos, el cual se centra en la eliminación de cualquier actividad que consume recursos, pero que no agrega valor para el cliente, conocida en *Lean* como despilfarro o desperdicio (Johansson & Sundin, 2014).

El objetivo inalcanzable es eliminar todos esos desperdicios, de forma que nada que no agregue valor al producto exista en el proceso de manufactura (Johansson & Sundin, 2014). En particular, se enfoca en la reducción de 7 desperdicios:

1. Sobreproducción: producir más de lo que necesita el cliente o hacerlo antes de lo necesario.
2. Inventario de material que no se está procesando actualmente, incluidas las materias primas, el trabajo en proceso y el inventario de productos terminados.
3. Defectos: piezas o material que no cumplen con las especificaciones requeridas.
4. Transporte: movimiento de material, ya sea de un paso del proceso al siguiente o dentro o fuera del inventario.
5. Tiempo de espera que los operadores, mecánicos o cualquier otra persona pasan esperando que el material o el equipo esté listo para usar.
6. Movimiento (de personas): caminar alrededor del equipo para llegar a donde se necesitan o para obtener piezas de cambio o herramientas.
7. Procesamiento: procesamiento excesivo, haciendo más en el material de lo que requiere el cliente (King & King, 2015).

El *Lean Manufacturing* se materializa en la práctica a través de la aplicación de una amplia variedad de técnicas, muy diferentes entre sí, que se han ido implementando con éxito en empresas de muy diferentes sectores y tamaños. Estas técnicas pueden implantarse de forma independiente o conjunta, atendiendo a las características específicas de cada caso. El número de técnicas es muy elevado y los expertos en la materia no se ponen de acuerdo a la hora de

identificarlas, clasificarlas y proponer su ámbito de aplicación. Algunas de las herramientas de mejora continua se describen a continuación (Hernández & Vizán, 2013).

#### **1.4.1 Las 5S**

El método 5S se aplica para obtener y mantener el orden y la limpieza en el trabajo. El nombre proviene de las iniciales de cinco palabras japonesas: seiri (elegir y separar), seiton (orden), seiso (limpiar), seiketsu (estandarizar) y shitsuke (mantener). El método 5S hace posible lo siguiente al mismo tiempo: aumentar la productividad; mejorar la calidad, la seguridad y la protección. Los beneficios obtenidos gracias a las 5S se miden utilizando los siguientes indicadores: productividad, cantidad de espacio ganado, defectos, trabajo en proceso/plazo de entrega y accidentes y lesiones (Chiarini, 2013).

#### **1.4.2 Cambio rápido de herramientas SMED**

SMED por sus siglas en inglés (Single-Minute Exchange of Dies), es una metodología o conjunto de técnicas que persiguen la reducción de los tiempos de preparación de máquina. Esta se logra estudiando detalladamente el proceso e incorporando cambios radicales en la máquina, utillaje, herramientas e incluso el propio producto, que disminuyan tiempos de preparación. Estos cambios implican la eliminación de ajustes y estandarización de operaciones a través de la instalación de nuevos mecanismos de alimentación/retirada/ajuste/centrado rápido como plantillas y anclajes funcionales (Hernández & Vizán, 2013).

#### **1.4.3 Mantenimiento Productivo Total TPM**

El Mantenimiento Productivo Total TPM (Total Productive Maintenance) se define como un nuevo enfoque para la gestión de equipos e instalaciones. Es una estrategia de mantenimiento total que incorpora la prevención del mantenimiento, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento relacionado con la mejora, con el objetivo final de minimizar las pérdidas y el desperdicio. Para adoptar y aplicar la nueva estrategia de mantenimiento con la participación total de los empleados, se requieren mayores compromisos en términos de capacitación, recursos e integración. Cuando la adopción de TPM es decidida por la organización en la que TPM busca involucrar a todos los empleados de todos los departamentos y niveles, es obligatorio desarrollar un plan maestro que abarque la provisión de capacitación y educación para la mejora continua y enfocada (Peng Au-Yong, Farhana Azmi, & Elyna Myeda, 2022).

#### **1.4.4 Jidoka**

Bajo la perspectiva Lean, el objetivo radica en que el proceso tenga su propio autocontrol de calidad, de forma que, si existe una anomalía durante el proceso, este se detendrá, ya sea automática o manualmente por el operario, impidiendo que las piezas defectuosas avancen en el proceso. Dado que sólo se producirán piezas con cero defectos, se minimiza el número de piezas defectuosas a reparar y la posibilidad de que éstas pasen a etapas posteriores del proceso (Hernández & Vizán, 2013).

#### **1.4.5 Mapeo de Flujo de Valor**

El mapeo de flujo de valor (VSM por sus siglas en inglés) es un diagrama de flujo de proceso que muestra cada paso en la producción de un bien o material, así como los recursos utilizados en cada paso y las relaciones entre los recursos. El mapeo de la cadena de valor es un componente muy importante de cualquier iniciativa *Lean*, ya que proporciona un marco que destaca el desperdicio y el efecto negativo que tiene en el rendimiento y el flujo general del proceso (King & King, 2015).

Al igual que con todas las herramientas, existe un proceso recomendado para utilizar el mapeo de flujo de valor (Figura 1.3), que consta de cuatro pasos.

1. Preparación. El primer paso del proceso, es fundamental para llevar a cabo un evento de VSM eficaz y para la implementación exitosa del "estado futuro" previsto; el paso de preparación ocurre antes del evento de mapeo en sí. Durante el paso de preparación, se reúne el equipo encargado del objetivo de mejorar el proceso de desarrollo.
2. Estado actual. En esta etapa se introduce toda la información recogida y analizada hasta el momento en un VSM denominado "actual" que actúa como fuente de información global de la situación de partida, visualizada a través de los flujos de producto, materiales e información.
3. Estado futuro. A partir de toda la información de etapas anteriores se plantean las posibles soluciones más efectivas y se diseña un nuevo VSM con el nuevo flujo de producto, materiales e información.
4. Planificación e implementación. Desarrollar un plan para implementación del estado futuro. El enfoque inicial de la implementación del estado futuro está en el desperdicio

que afecta de manera más significativa el estado actual de los procesos de desarrollo: desperdicio de defectos y corrección (Locher, 2008).

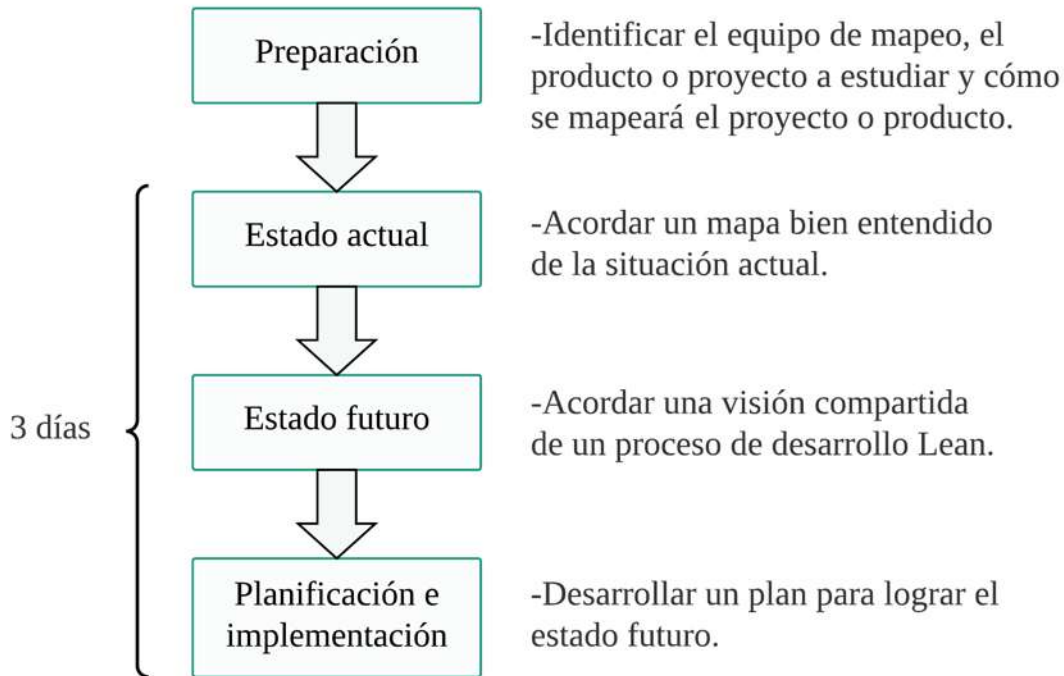


Figura 1.3. Proceso del mapeo de flujo de valor

Fuente: (Locher, 2008)

El verdadero poder del mapeo de la cadena de valor no radica en representar visualmente el estado actual de un proceso, sino más bien en las acciones que se toman y los resultados logrados al hacerlo. En otras palabras, el poder del proceso radica en desarrollar “estados futuros” logrados que brinden resultados revolucionarios a una organización (Locher, 2008).

### **Ventajas del VSM**

- Proporciona una comprensión de las operaciones que están creando valor para el cliente.
- Destaca las principales formas de residuos que se encuentran en una operación de procesos.
- Proporciona algunas pistas sobre las causas fundamentales de los desechos.
- Proporciona una plantilla para el diseño de un estado futuro mejorado y los datos para cuantificar mejoras de rendimiento (Locher, 2008).

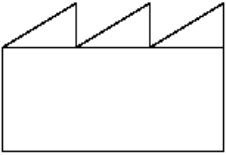
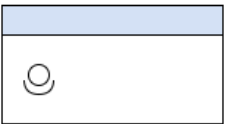
## Desventajas

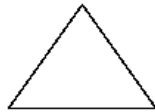
- Poco aplicable en empresas que fabrican bajos volúmenes y gran variedad de productos.
- Muchos de los símbolos fueron creados para el caso específico de Toyota y no serían aplicables a otras empresas.
- Cuando se realizan las observaciones, los analistas de VSM con frecuencia toman en cuenta el desempeño de los empleados en su trabajo. Pero tal vez no todo lo que el empleado hace, se relaciona directamente con la fabricación y desarrollo del producto que se está estudiando.
- Para lograr mapas VSM efectivos se debe observar el trabajo en su totalidad, lo cual incluye estudiar también lo que sucede cuando el trabajo no está siendo realizado (Rueda, 2013).

## Símbolos

Los iconos estándar se utilizan para hacer que el VSM sea más visual y más fácil de entender. Estos iconos, se han convertido en símbolos universales dentro de la organización *Lean*, los iconos más comúnmente utilizados para el flujo de material y las partes del flujo de información del VSM se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Símbolos de VSM

Icono	Cómo usarlo
 <p data-bbox="297 1455 521 1486">Cliente/Proveedor</p>	<p data-bbox="605 1287 1425 1570">Este es el símbolo utilizado para plantas y sitios de proveedores o clientes. Si se refiere a un proveedor, entonces se pueden agregar los siguientes datos: cantidad de artículos por mes o día, bandeja (pallet, cajas de producto, capacidad), entrega a tiempo (OTD), Productos pedidos por mes o día, cifras de venta por mes/año, número de horas de servicio al mes, número de operaciones, etc.</p>
 <p data-bbox="358 1728 459 1759">Proceso</p>	<p data-bbox="605 1581 1425 1824">Este es el símbolo que representa varios procesos de producción e implementación de servicios. El pequeño símbolo en la esquina izquierda es un trabajador, por lo que junto a él se puede anotar la cantidad de trabajadores en este proceso. En el cuadro de la esquina derecha se puede escribir cualquier software que se esté utilizando.</p>



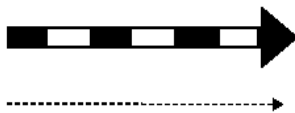
Inventario

El símbolo de inventario hace visible la acumulación de productos entre un proceso y otro. El inventario también se puede expresar en WIP (work in process) o tiempo, y en servicios u oficinas puede referirse a documentos, correos electrónicos, ofertas y carpetas que necesitan ser procesados o almacenados.

C/T (Cycle Time)
C/O (Changeover)
Quantity
Wait
Downtime
rework
%VA (Value Added)

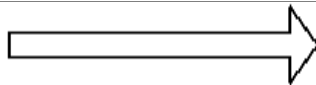
Caja de datos

El cuadro de datos, un cuadro que contiene información importante sobre el proceso, se coloca debajo del cuadro de proceso. El C/T y el tiempo de configuración o C/O suelen aparecer en todas las casillas del proceso de producción. . Otros datos interesantes pueden ser unidades producidas por día o turno, tiempo de inactividad y tiempo de actividad de la máquina, tiempo de espera, productos que necesitan ser reelaborados o rechazados, etc.



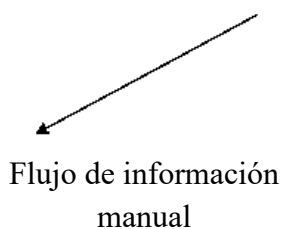
EMPUJAR  
TIRAR

La flecha rayada representa materiales en movimiento en una acción de "empujar" de un proceso a otro o hacia el cliente; la flecha más fina significa "tirar".



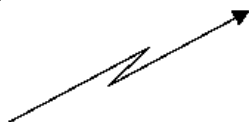
Material para un cliente o  
de un proveedor

Representa el envío (a menudo asociado con el símbolo de un camión).



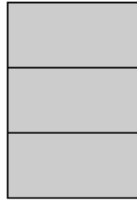
Flujo de información  
manual

Flecha que representa el intercambio de información entre procesos. La dirección del flujo es opuesta a la de los materiales (de derecha a izquierda). Esta flecha representa información informal (por ejemplo, por teléfono) o formal (por ejemplo, formulario).



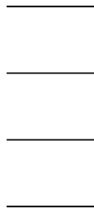
Información electrónica

Flecha de intercambio de información electrónica (extranet, intranet, etc.).



Stock de seguridad.

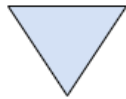
Stock de seguridad



Inventario gestionado como supermercado

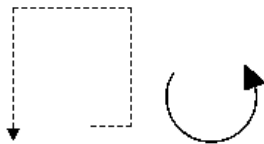


El "supermercado" es un WIP típico que se vuelve necesario a veces cuando el flujo no puede mantenerse al día. Por ejemplo, cuando se trata de procesos más lentos (por ejemplo, un tratamiento térmico que solo procesa un lote a la vez) seguido de procesos más rápidos (por ejemplo, una celda de flujo de una pieza), o suministros que provienen de un proveedor que tiene el mismo problema, o no puede enviar lotes pequeños debido a problemas logísticos. El supermercado, combinado con Kanban, ayuda a evitar la programación y limita los inventarios (que, sin embargo, aún representan un desperdicio).



Símbolo Kanban

El símbolo Kanban generalmente significa un punto de reorganización para la producción del proceso anterior.



JALAR

Representa la atracción del proveedor de un proceso de cliente de un supermercado.

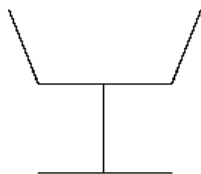


Transporte

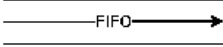
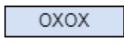
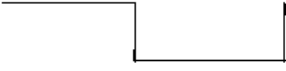




Kanban de producción

Estos son los íconos Kanban: producción (simple) y retiro (discontinuo), producto individual o contenedor (primera fila) o en lotes (segunda fila).



Estante kanban

Estante kanban	
 First-In-First-Out	El símbolo First-In-First-Out (FIFO) indica una conexión física entre dos procesos con diferente capacidad.
 Icono de equilibrio	Es el icono de equilibrio y representa la combinación productiva de diferentes códigos o números de pieza en el intento de reducir lotes y lograr un flujo de una sola pieza. Obviamente, esto significa reducir las configuraciones, introducir tecnología de grupo y usar celdas en forma de U.
 Segmento de escala temporal	Los segmentos de tiempo se colocan en la parte inferior del mapa; resumen todas las L / T en la parte superior y C / T o P / T en la parte inferior. La parte inferior se coloca junto a la caja de proceso.
 Ir a ver programación	Las gafas "ir a ver la programación" actúan como una advertencia contra un programa de programación que puede causar desalineación entre los procesos y, por lo tanto, WIP.
 Taller Kaizen	Después de haber dibujado el VSM del estado actual y haberlo analizado, se debe tomar la decisión de dónde mejorar. El icono del proyecto de mejora también se puede utilizar en el futuro VSM del estado para subrayar el hecho de que un Taller Kaizen u otro proyecto de mejora se ha llevado a cabo con éxito.

Fuente: elaboración propia en base a Chiarini, 2013.

## **1.5 ANTECEDENTES**

La siguiente sección muestra los tópicos relacionados con el análisis de ciclo de vida y las herramientas de manufactura esbelta, aplicados en los sistemas de gestión de residuos con distintas opciones terminales.

### **1.5.1 Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de gestión de residuos**

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida se ha aplicado al estudio de los sistemas de gestión de residuos SÓLIDOS, con el objetivo de mejorar dichos sistemas. El ACV permite comparar distintas opciones de tratamiento para los residuos, como escenarios de reciclaje o recuperación de materiales, disposición en relleno sanitario, incineración, biodigestión anaerobia u otras (Juarez, Guereca, & Gasso, 2008). Esta comparativa resulta útil para identificar los impactos asociados a cada una de las alternativas de tratamiento dentro de un sistema de gestión y así establecer una línea base de los sistemas en función actuales, en donde sea que se lleve a cabo dicho estudio (Zarea, Moazed, Ahmadmoazzam, Malekghasemi, & Jaafarzadeh, 2019). En el caso del impacto ambiental de la incineración de residuos sólidos, se ha reportado por algunos autores (Campos Ortiz, 2011) con el enfoque mayormente de recuperación de energía. Sin embargo, en el caso de México y América latina, es escasa la información del estudio del impacto ambiental de la opción de incineración, y muy particularmente es escasa la información en relación a la incineración de residuos biológico infecciosos.

### **1.5.2 Análisis de ciclo de vida aplicado a incineración de residuos sólidos**

La incineración de residuos sólidos como opción de tratamiento ha sido analizada usando el ACV. Algunos aspectos que se han considerado incluyen la recuperación de energía y por tanto el uso u origen del combustible utilizado. El *hotspots* identificado por algunos autores (Mohamed, 2015) es el consumo eléctrico dentro de la planta incineradora, mientras que las categorías de impactos ambientales significativas incluyen aquellas relacionadas con la generación de energía por combustibles fósiles, principalmente el agotamiento de recursos abióticos y el calentamiento global. Aún más, de acuerdo a Beylot et al (2018), la recuperación

de energía en el sistema de gestión de residuos a escala nacional en Francia, es capaz de promover un impacto positivo en la categoría de cambio climático.

Incluso, se ha reportado que algunas acciones tales como el reciclaje de metal, practica usualmente reportada como de impacto positivo, no contribuye de manera significativa en el resultado global (Turconi, Butera, Boldrin, & Grosso, 2011), considerando que los principales impactos de la práctica de incineración se reflejan desde el uso de combustibles fósiles. En México, el mix eléctrico se basa 80% en combustibles fósiles, por lo que es posible que los impactos ambientales derivados de prácticas de incineración también tengan su contribución significativa en el uso de electricidad, diésel o gas.

### **1.5.3 *Lean manufacturing* aplicado a sistemas de gestión de residuos**

La metodología de Lean manufacturing se ha aplicado a los sistemas de gestión de residuos sólidos, con el objetivo de mejorar dichos sistemas. Este método, busca eliminar cualquier actividad que consume recursos pero que no agrega valor para el sistema, como inventarios innecesarios, sobre procesamiento, espera y transporte a esto se le conoce como desperdicio. Klein et al. (2020), aplicaron esta metodología para proponer un sistema de gestión de residuos sólidos en un Instituto de Educación Superior (IES). La principal contribución de este estudio a la teoría de la aplicación Lean manufacturing en IES es la organización de residuos en un marco de referencia. Los resultados de este estudio proporcionan una herramienta principal para la evaluación y priorización de residuos. Sin embargo, a nivel mundial son pocos los estudios que reportan la aplicación de la manufactura esbelta a los sistemas de gestión de residuos y en particular es nula la información sobre la aplicación a la incineración de RPBI.

### **1.5.4 *Lean Green* aplicado a sistemas de gestión de residuos**

Fercoq et al. (2013), realizaron un estudio para la elaboración de un modelo de gestión de residuos, utilizando la metodología *Lean Green*. Este modelo cuenta con tres niveles clave que son: un proceso de mejora integrado, una matriz estratégica y conjunto de herramientas integradas y un método avanzado 3R (reducción/ reutilización/ recuperación). Este modelo puede aportar una mejora constante, a un programa de minimización de costos de tratamiento

de residuos y mejorar los impactos ambientales y sociales (Fercoq, Lamouri, Carbone, Lelièvre, & Lemieux, 2013).

Hoy en día a nivel mundial no hay suficiente información relacionada con la aplicación de *Lean Green* a sistemas de gestión de residuos y no existe ningún estudio que mencioné la aplicación de *Lean Green* a incineración de RPBI. En México, no hay antecedentes sobre investigaciones relacionadas al tema.

# CAPÍTULO 2    Proceso de incineración

---

Este capítulo abordará las partes teóricas del proceso de incineración de residuos sólidos como fundamentación para el desarrollo del ACV.

## 2.1 Definición de incineración

La incineración es el proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. Los principales productos de la incineración son el dióxido de carbono, el agua, las cenizas y el calor residual (SEMARNAT, 2012).

### 2.1.1 Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el COMBUSTIBLE, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), un líquido (Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el COMBURENTE, Oxígeno. La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable. Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores (García San José, 2001):

- Combustible.
- Comburente.
- Energía De Activación.

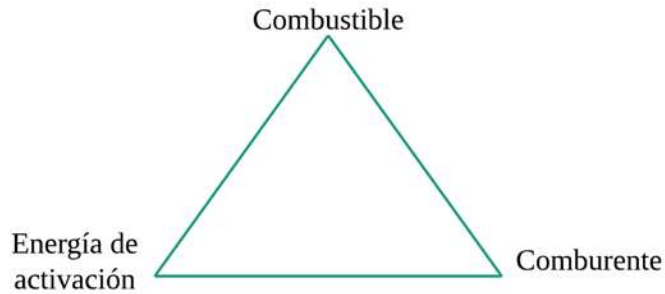


Figura 2.1. Triángulo de la combustión

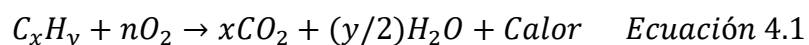
Fuente: García San José, 2001

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión (Figura 2.1), en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo.

El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O<sub>2</sub>) y 79% Nitrógeno (N<sub>2</sub>); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo, en soldadura) (García San José, 2001).

La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, etc.

La mayoría de los combustibles, al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos, básicamente, por Carbono (C) e Hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como Azufre (S), Humedad (H<sub>2</sub>O), Cenizas, etc. En primer lugar, se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H). En la práctica los combustibles pueden definirse de la forma C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, dando lugar a las siguientes reacciones:



De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos:

- a) **Combustión completa:** ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.
- b) **Combustión incompleta:** se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.
- c) **Combustión estequiométrica o teórica:** Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.
- d) **Combustión con exceso de aire:** Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso.
- e) **Combustión con defecto de aire:** Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción (Danilin, 1999).

## 2.1.2 Tópicos seleccionados sobre procesos de combustión

Los procesos de combustión involucran transporte de masa y energía y reacciones químicas. Dependiendo del ritmo relativo de estos pasos necesarios, las características del proceso cambian. Dichos cambios pueden afectar el grado de éxito del sistema de combustión para funcionar de acuerdo con las expectativas. El objetivo de la ingeniería de diseño es aplicar la comprensión de los procesos físicos y químicos que gobiernan los sistemas de interés para predecir cuantitativamente el rendimiento.

### 2.1.2.1 Combustión gaseosa

Aunque la mayoría de los desechos que requieren incineración no son gaseosos, la mayor parte de la combustión se completa mediante reacciones en fase gaseosa. Muchos líquidos se vaporizan en el ambiente del horno caliente, y son las moléculas de gas resultantes las que

realmente se involucran en la combustión. Los líquidos y sólidos más pesados se pirolizan mediante un calentamiento intenso. Esto genera fragmentos volátiles de menor peso molecular que se queman en la fase gaseosa. Incluso el carbón carbonizado (que aparece como el desecho de interés o como un producto del proceso de pirólisis) generalmente se gasifica (por oxígeno o vapor de agua) a monóxido de carbono que se quema en la fase gaseosa.

### **2.1.2.2 Combustión líquida**

La combustión de líquidos comienza con la acumulación de calor en la masa líquida de la radiación de la llama o de las paredes refractarias calientes, de la recirculación de gases quemados o de un quemador piloto. Finalmente, el combustible se acerca a su punto de ebullición y comienza a vaporizarse. Los vapores del combustible luego se difunden desde la superficie del líquido, se mezclan con el oxígeno del aire y aumentan de temperatura. En algún momento, la velocidad de las reacciones de oxidación y la liberación de calor asociada es lo suficientemente alta como para que se produzca una ignición y una combustión completa.

### **2.1.2.3 Combustión sólida**

La combustión de desechos en fase sólida, como ocurre con los líquidos, es en gran parte un proceso de gasificación seguido de la combustión de los productos gaseosos. Incluso en los casos en que ocurre un ataque heterogéneo del sólido por un oxidante gaseoso como  $O_2$ ,  $CO_2$  o  $H_2O$  (por ejemplo, en la combustión de coque), el subproducto inicial es a menudo monóxido de carbono en lugar de  $CO_2$  completamente oxidado.

El desarrollo de hornos para quemar sólidos ha dado lugar a tres modos de cocción característicos

1. Quema por suspensión: los sólidos se queman mientras son arrastrados por una corriente de aire que se mueve rápidamente. En algunas realizaciones, las partículas de sólidos se dividen finamente y se secan.
2. Quema de semisuspensión: los sólidos subdivididos en forma gruesa se inyectan mecánica o neumáticamente en el espacio de combustión. El secado y la combustión ocurren parcialmente mientras los sólidos están en el aire y se completan después de que las partículas caen a una rejilla.

3. Quema en masa: los sólidos no subdivididos o subdivididos de forma gruesa se mueven al espacio de combustión por medios mecánicos (p. Ej., Mediante ariete hidráulico, carga manual o aspiración en una rejilla) y se empujan, arrastran o hacen girar a través del horno hasta que se obtiene un grado satisfactorio de quemado.

En la práctica de eliminación de desechos, se ha utilizado cada una de estas técnicas.

## **2.2 Energía térmica**

La unidad básica de energía térmica será el kilogramo de calorías (kcal): la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1 kg de agua a 1 ° C. La Unidad Térmica Británica (Btu), la energía necesaria para elevar la temperatura de 1 libra de agua a 1 ° F, es la cantidad de energía comparable en unidades inglesas. Los factores de conversión comúnmente utilizados son 1 kcal = 4186,8 J o 3,968 Btu, 1 kcal / kg = 1,8 Btu / lb, 1 Btu = 1055,1 J y 1 Btu / lb = 2326 J / kg (Niessen, 2010).

### **2.2.1 Calor de reacción**

El calor de reacción se define como el cambio de entalpía neto resultante de una reacción química. El efecto energético puede ser una liberación neta de energía (una reacción exotérmica) o una absorción de energía (una reacción endotérmica). El calor de reacción se puede calcular como la diferencia en el calor de formación ( $\Delta H_{298}$ ) entre productos y reactivos. El calor de formación es el efecto del calor cuando el compuesto se forma a partir de sus elementos constituyentes en sus estados estándar (generalmente 298.15 ° K a 1 atm). Es importante señalar que, por definición, el calor de formación de los elementos en sus estados estándar es cero.

Para el caso especial en el que la reacción de interés es la oxidación a temperaturas elevadas, nos referimos al efecto de calor como calor de combustión. El calor de combustión para combustibles a base de carbono, hidrógeno y oxígeno y para corrientes de desechos es, claramente, la liberación de energía cuando la sustancia o sustancias reaccionan completamente con el oxígeno para formar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Esta liberación de calor se puede calcular como la diferencia entre los calores de formación de los productos y los reactivos.

### 2.2.2 Calor sensible de los gases

Al analizar los sistemas de combustión, a menudo es necesario calcular el contenido de calor sensible (entalpía) de los gases a temperaturas elevadas o determinar el cambio de entalpía entre dos temperaturas. Para hacer tales cálculos, se puede recurrir a la aproximación de que,  $Mc_p$ , el calor específico molar a presión constante (en unidades de kcal/kg mol °C, que es, dicho sea de paso, numéricamente idéntico a Btu/lb mol °F) es en función de la temperatura solamente y asintóticamente se acerca a un valor  $Mc_p^\circ$  cuando la presión se acerca a cero. El cambio de entalpía ( $\Delta h$ ) entre los límites de temperatura  $T_1$  y  $T_2$  viene dado por:

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} Mc_p^\circ dT \text{ kcal/kg mol} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

### 2.2.3 Calor latente

El cambio de estado de elementos y compuestos, por ejemplo, de sólido (s) a líquido (l), o de líquido (l) a gas (g), se acompaña de un efecto de calor: el calor latente de fusión, sublimación, o vaporización para los cambios de estado (s)  $\rightarrow$  (l), (s)  $\rightarrow$  (g) y (l)  $\rightarrow$  (g), respectivamente. Los efectos del calor latente en muchos procesos industriales son insignificantes. Por ejemplo, el calor de vaporización del fueloil generalmente se ignora en los cálculos de combustión. Particularmente para los cálculos de diseño de incineradores que involucran desechos o combustibles con un alto contenido de hidrógeno y / o alto contenido de humedad, los efectos del calor latente son muy significativos.

### 2.2.4 Energía cinética y potencial

En concepto, una fracción del calor de combustión en combustibles y desechos se puede convertir en energía cinética (velocidad) y potencial (presión o elevación). Claramente, tal conversión es esencial para el funcionamiento de motores de cohetes, turbinas de gas y otras cámaras de combustión altamente especializadas (Niessen, 2010).

### 2.2.5 Pérdidas de calor

Por lo general, las mayores pérdidas de energía de un sistema de combustión son el calor sensible (pérdida de gas seco) y el calor latente (pérdida de humedad) de los gases de combustión. La pérdida de calor sensible se escala por la temperatura del gas de chimenea. Las pérdidas latentes incluyen el calor de evaporación del agua líquida en la alimentación más el del

agua formada por la oxidación del hidrógeno de alimentación y combustible. Estas pérdidas son inevitables, pero pueden minimizarse.

Una segunda categoría de pérdida de calor está asociada con la energía del combustible que sale del sistema como combustible no quemado en residuos sólidos y como gases combustibles (CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, etc.) en el gas de chimenea. El combustible no quemado a menudo resulta de las bajas temperaturas en las zonas de la cámara de combustión. Para lograr un quemado rápido y completo, son necesarias altas temperaturas y las altas velocidades de reacción de oxidación asociadas. Además, es posible que el combustible no se oxide por completo debido a deficiencias en el suministro de aire o una mezcla ineficaz.

### **2.3 Balances de materia**

Un balance material es una expresión cuantitativa de la ley de conservación de la materia: lo que entra sale (a menos que se quede atrás).

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación.}$$

Esta expresión siempre es cierta para los elementos que fluyen a través de los sistemas de combustión (excepto para desviaciones menores en el caso inusual en el que están involucrados materiales radiactivos). A menudo, no es cierto para los compuestos que participan en las reacciones de combustión. Debido a su carácter fundamental y credibilidad intrínseca, el balance de materiales es una de las herramientas más útiles para el análisis de sistemas de combustión.

#### **2.3.1 Balances basados en análisis de combustible**

Los balances de elementos en el combustible o los desechos permiten calcular la cantidad de aire que teóricamente se requiere para oxidar completamente el carbono, el hidrógeno neto, el azufre, etc. Esta cantidad de aire (conocida como el requisito de aire teórico o estequiométrico) a menudo es insuficiente para lograr una combustión completa en una cámara de combustión práctica y generalmente se suministra aire en exceso, definido como un porcentaje de la cantidad de aire estequiométrico.

## 2.4 Balances de energía

Un balance energético es una expresión cuantitativa de la ley de conservación de la energía. En el análisis del sistema de incineración de residuos, cinco cantidades de energía son de interés principal:

- Energía química: el calor de las reacciones químicas (sobre todo, reacciones de oxidación) que incluyen combustión y disociación. Esta cantidad debe corregirse por cualquier valor de combustible "no liberado" en los residuos o gases de escape.
- Calor latente: el calor para cambiar el estado de los materiales, que incluye sublimación, fusión y vaporización.
- Calor sensible: el contenido de calor relacionado con la temperatura de los materiales.
- Pérdidas de calor: En las paredes de los sistemas de combustión.
- Calor útil: Se entrega a los tubos de la caldera o a los materiales que se calientan mediante el proceso de combustión.

La única condición de referencia de energía verdaderamente básica para los cálculos de energía es para el caso en el que los materiales están en cero absoluto ( $-273\text{ °C}$  o  $-460\text{ °F}$ ). Sin embargo, por conveniencia, a menudo se utiliza una condición de 1 atm y  $15,6\text{ °C}$  ( $60\text{ °F}$ ) como referencia para el contenido de calor sensible. La mayoría de los datos de laboratorio sobre reacciones químicas y energía latente se informan a temperaturas de referencia de 15 a  $25\text{ °C}$ .

## 2.5 Cinética de la combustión

La cinética de combustión describe las relaciones entre la velocidad de reacción de combustión y los parámetros básicos del sistema y ambientales. Las aplicaciones de incineración del proceso de combustión persiguen el ideal de que la reacción sea completa al 100%: destrucción total del material de alimentación. Se podría argumentar que este objetivo es el mismo para todos los procesos basados en combustión. Sin embargo, para las aplicaciones de incineración, el propósito principal del sistema es la destrucción de la alimentación, no la liberación de energía como medio para otros fines (como la generación de electricidad).

Como mínimo, se deben comprender los conceptos de temperatura de ignición; las situaciones que conducen a la "extinción" de las reacciones de combustión; y la importancia del agotamiento

de oxígeno en el agotamiento. Además, es conveniente comprender las relaciones cinéticas específicas de los productos comunes de combustión incompleta (PIC) (monóxido de carbono y hollín) y la cinética de oxidación y pirolítica de un espectro de compuestos orgánicos importantes (Niessen, 2010).

### **2.5.1 Mecanismo de la cinética general**

La formulación de las expresiones de la velocidad de reacción a partir de las relaciones estequiométricas simples extraídas de la ecuación de la reacción puede ser errónea. En tales casos, el error a menudo se puede eliminar cuando se comprende mejor la secuencia completa de reacciones que van de los reactivos a los productos. Explorar la verdadera ruta de una reacción es el estudio del mecanismo. Dichos estudios, particularmente en los sistemas de combustión, a menudo muestran el papel vital de especies altamente activadas, fragmentos de moléculas, llamados radicales libres. Los radicales libres, que existen individualmente solo durante fracciones de segundo, son, no obstante, intermediarios importantes en el inicio y propagación de las reacciones de combustión.

### **2.5.2 Cinética de la oxidación del monóxido de carbón**

El monóxido de carbono es un contaminante importante del aire, un gas venenoso en altas concentraciones, y puede ser el depósito no deseado de una considerable energía de combustión en cámaras de combustión ineficientes. En muchos casos en los que se queman hidrocarburos, las reacciones de oxidación avanzan rápidamente hasta el punto en que se forma CO y luego se ralentiza mucho hasta que se logra la combustión del CO. De hecho, la cinética de la oxidación del metano casi duplica las expresiones cinéticas del CO. El CO se produce por la combustión incompleta de productos de pirólisis de desechos sólidos o líquidos, del carbón en un lecho de basura o como un producto de combustión intermedio.

### **2.5.3 Cinética de la oxidación de hollín**

Al quemar desechos que contienen carbono, las condiciones de alta temperatura y baja concentración de oxígeno pueden conducir a la formación de hollín. Los mecanismos responsables de la formación de hollín incluyen la oxidación preferencial del hidrógeno y la deshidrogenación inducida térmicamente. Cualquiera sea la causa, la formación de hollín es un problema para el sistema de incineración:

1. Emisiones de gases de combustión oscuros y de alta densidad óptica.
2. La presencia de carbono es un signo de malas condiciones de combustión y, a menudo, va acompañada de elevadas emisiones de monóxido de carbono y puede indicar una combustión incompleta de los desechos y/o la generación de PIC indeseables.
3. Las superficies metálicas (por ejemplo, el lado del fuego de los tubos de la caldera) expuestas a gases que oscilan entre condiciones oxidantes y reductoras (la región donde se forma el hollín a menudo se está reduciendo) pueden experimentar altas tasas de desperdicio.
4. Si se utiliza un precipitador electrostático para el control de la contaminación del aire, la presencia de carbono reduce la resistividad del polvo y, por lo general, reduce la eficiencia de recolección.
5. Si es necesario quemar el hollín (una vez que se ha formado), la velocidad lenta de quemado del hollín dificulta estos esfuerzos de control posteriores (pueden requerir altas temperaturas y un tiempo de residencia prolongado).
6. Las altas concentraciones de hollín en el polvo acumulado pueden crear un problema de incendio y explosión.

## **2.6 Caracterización de los residuos**

El primer paso para resolver los problemas de gestión de residuos es abandonar la visión desesperada de que los "residuos" son un estado indefinido de la materia vinculado a su génesis como residuo inutilizable de un proceso o descarte no deseado de la actividad humana. En cambio, los desechos deben considerarse por derecho propio como materia prima, combustible y/o material potencialmente útil.

Apoyando esta línea de pensamiento, hay que descartar la sensación de que el "residuo" es tan heterogéneo en su composición y tan variable en sus propiedades que los problemas con su adecuado manejo y uso no se pueden definir, y mucho menos resolver. Sin duda, los flujos de desechos a menudo exhibirán una gran variabilidad de un punto a otro y con el tiempo (Niessen, 2010).

### **2.6.1 Composición química de los residuos**

La importancia relativa de la composición química de un residuo es generalmente mayor para los lodos/residuos sólidos que para los líquidos y mucho más que para los gases. Esta generalización se deriva de la fracción generalmente grande de componentes inorgánicos no combustibles en los desechos sólidos y del impacto frecuentemente importante de estos elementos en el diseño del sistema. La presencia de elementos y compuestos tóxicos también es importante a través del impacto resultante en la seguridad de los trabajadores, los requisitos de eficiencia del sistema de combustión, el control de la contaminación del aire (APC, por sus siglas en inglés) y/o la designación de la unidad como un “incinerador de desechos peligrosos”.

### **2.6.2 Calor de combustión**

En el análisis y diseño de sistemas de incineración, pocos parámetros de residuos son tan importantes como el calor de combustión. Las correlaciones y las herramientas de estimación proporcionadas aquí están más adaptadas al campo de la incineración de residuos y, en algunos casos, pueden aplicarse más fácilmente. Todos los métodos de estimación se basan en el uso del análisis final para sintetizar el calor medio de combustión. Como tal, su precisión depende de la precisión del análisis final subyacente.

### **2.6.3 Residuo sólido**

La mayor parte del material que se incinera se incluye en la clase de "residuos sólidos". Desafortunadamente, esta clase de desechos es muy difícil de tratar como "material de ingeniería". Asegurar una muestra representativa es a menudo muy problemático. La manipulación de materiales es difícil y puede exponer a los trabajadores a riesgos. La mezcla es lenta e incompleta.

#### **2.6.3.1 Composición de los residuos sólidos**

En este contexto, la composición se refiere a la categoría de material (papel, vidrio, etc.) en las corrientes de desechos. Los datos de composición se informan de esta forma, ya que el "método de análisis" (categorización visual) es de bajo costo y se puede aplicar rápida y económicamente a grandes cantidades de desechos.

## **2.7 Transferencia de calor**

Para tratar los complejos problemas del análisis de la transferencia de calor para combustores se deben tener en cuenta varias consideraciones relacionadas con la transferencia de calor.

### **2.7.1 Conducción**

Las áreas principales de aplicación del análisis de transferencia de calor por conducción en el diseño de sistemas de incineración son, la estimación de las tasas de calentamiento del combustible, la predicción de las pérdidas de calor y las temperaturas de la pared exterior para la cámara de combustión. Aunque el flujo de calor en los sistemas de combustión es en gran parte radiativo (excepto el calentamiento por convección de los tubos de la caldera), la pérdida de calor por conducción a través de las paredes refractarias puede exceder el 2-8% de la liberación total de calor y puede resultar en temperaturas inseguras en las paredes exteriores.

### **2.7.2 Convección**

La convección de los gases calientes a la pared, aunque es importante en el diseño de la caldera, suele ser menos importante que la radiación en el análisis del sistema de combustión. Una excepción particular ocurre cuando chorros de aire caliente o llamas inciden sobre una superficie. Esto puede suceder cuando los chorros de aire de sobrecombustión de las paredes laterales se descargan a través de hornos estrechos o las llamas de los quemadores inciden en el extremo opuesto del horno. Las tasas de transferencia de calor en el punto de impacto pueden ser extremadamente altas. Los consiguientes daños en el refractario o en los tubos de la caldera pueden ser excesivos.

## **2.8 Escoria y ensuciamiento**

La ceniza es un componente importante de los desechos. La ceniza diluye el contenido combustible de los desechos y la presencia de cantidades significativas de ceniza requiere una gran inversión en instalaciones para capturar, manipular y almacenar el material después del proceso de combustión. Sin embargo, los problemas relacionados con las cenizas más importantes surgen debido a los depósitos de cenizas en las paredes laterales y los tubos de la caldera del recinto de combustión y el equipo de recuperación de calor. La deposición de cenizas conduce a problemas con la integridad estructural que surgen tanto de la masa de las

acumulaciones de escoria como del daño que se puede hacer a las rejillas y al equipo de manipulación de materiales por la caída de trozos de ceniza. Los depósitos de ceniza también contribuyen a la corrosión del tubo y, a través de la interacción química, al ataque (fluxing) del refractario. La acumulación de escoria aísla los tubos y reduce la tasa de transferencia de calor. En casos severos, los depósitos acumulados interfieren con el flujo de los gases de combustión a través de los pasos de la caldera.

## **2.9 Preparación y manipulación de residuos sólidos**

Probablemente ningún elemento de los sistemas de incineración cause más problemas que los relacionados con el manejo de desechos. Una de las diferencias más significativas entre los sistemas de incineración de desechos líquidos y gaseosos y los de lodos y sólidos se refiere al equipo utilizado para recolectar, transportar, almacenar, recuperar y quemar los desechos. En muchos casos, las debilidades o fallas en el diseño de los subsistemas de manejo de materiales han reducido en gran medida la utilidad y aumentado los problemas de operación y mantenimiento y los costos de las instalaciones de manejo de desechos sólidos o de lodos.

### **2.9.1 Manejo de residuos sólidos en fosos y grúas**

El enfoque de pozo y grúa para la recepción, almacenamiento y carga de desechos se utiliza en todo el mundo en grandes plantas incineradoras. El operador de la grúa es un miembro clave del personal del incinerador. Sus funciones incluyen el desvío de artículos voluminosos problemáticos, la mezcla de desechos segregados, altamente combustibles y no combustibles para igualar la tasa de liberación de calor en el horno, y reubicar y apilar la pila de desechos que se acumula directamente debajo de las posiciones de vuelco para aumentar la capacidad de almacenamiento de la fosa.

### **2.9.2 Reducción de tamaño de RSU**

La reducción de tamaño es un paso necesario en la producción de RDF (combustible derivado de residuos). Además, a veces se utiliza una descomposición limitada de los desechos tal como se reciben antes de los sistemas de quema masiva para facilitar la recuperación de materiales antes de la combustión.

La reducción del tamaño de los desechos sólidos es un proceso complejo. A diferencia del carbón y la mayoría de los materiales minerales, solo una pequeña fracción de los desechos municipales se descompone bajo fuerzas de trituración (por ejemplo, vidrio). La mayoría de los materiales en los desechos se deforman, estiran o simplemente se comprimen por las fuerzas de trituración. No solo no se subdivide el material, sino que también se absorbe una energía considerable. Esto aumenta el costo de procesamiento sin proporcionar el beneficio. Por lo tanto, debemos agregar acciones de corte, desgarro y corte.

### **2.9.3 Transporte de residuos sólidos**

Para muchos sólidos a granel, las propiedades físicas y descriptivas que afectan el transporte y otras operaciones de manipulación de materiales caen dentro de una banda bastante estrecha. Esas propiedades quedan fuera del rango "normal" para residuos sólidos mezclados, para RDF procesados y para muchos componentes de residuos. Más allá de sus características "promedio" inusuales, las propiedades de los desechos y los componentes de los desechos a menudo varían ampliamente. El diseño de transportadores se basa en datos de ingeniería sobre las propiedades de los materiales y las interacciones de manipulación de materiales (Niessen, 2010).

### **2.9.4 Clasificación de tamaños y cribado**

Se utilizan varios dispositivos para eliminar finos y concentrar fracciones combustibles y no combustibles. Estos incluyen clasificadores de aire, cribas de disco y trommels.

- Clasificación de aire. Los clasificadores de aire utilizan la influencia de un flujo de aire de alta velocidad para efectuar la separación aprovechando las diferencias entre las propiedades aerodinámicas e inerciales del constituyente de los desechos sólidos.
- Cribas. Las cribas separan los materiales mezclados en clases según la capacidad de las partículas para atravesar o ser retenidas en una abertura de un tamaño determinado.
- Trommels. Un trommel es un tambor giratorio perforado en parte o en toda su longitud con orificios o ranuras circulares. Son elementos comunes y efectivos y son útiles para romper bolsas, como un medio para romper la mayoría (no todas) de las botellas de vidrio y para eliminar arena, vidrio y otros finos.

### **2.9.5 Separación de metales ferrosos**

La separación de metales ferrosos se practica tanto antes (eliminar el metal ferroso de los residuos triturados) como después de la combustión (recuperar el metal ferroso del residuo). En ambos casos, se utilizan electroimanes permanentes o electroimanes para efectuar la separación. El diseño de las separaciones de metales ferrosos suele ser de dos tipos:

1. Una banda continua equipada con imanes (un imán de banda) operando una banda transversal sobre un transportador que maneja desechos mezclados y extrae metales ferrosos del transportador.
2. Un tambor equipado con electroimanes o una correa magnética que opera en el punto de descarga de un transportador. En algunos casos, el imán se activa sólo durante una fracción preestablecida de la rotación del tambor o el movimiento de la correa, de modo que el metal ferroso se libera con una trayectoria diferente y se dirige a un receptor especial.

### **2.10 Incineración de residuos sólidos**

La incineración de residuos es el arte de la combustión completa de residuos, manteniendo o reduciendo los niveles de emisión por debajo de los estándares de emisión actuales y cuando sea posible, recuperando energía, así como eventuales residuos de combustión. Las características esenciales son las siguientes: lograr una reducción profunda del volumen de desechos; obteniendo un residuo compacto y estéril, pero tratando un flujo voluminoso de gas de combustión mientras se elimina en profundidad una amplia gama de contaminantes (Bukens, 2013).

Los objetivos de rendimiento de un sistema de incineración de residuos municipales son procesar la cantidad mínima semanal, mensual y/o anual de residuos, operar consistentemente dentro de los límites de emisión y otras restricciones ambientales. Para proteger la salud y el bienestar de los empleados del incinerador y de la comunidad.

#### **2.10.1 Consideraciones de diseño del sitio**

El diseño del sitio del incinerador tiene un impacto significativo en el costo de la instalación, el control de la escorrentía de aguas pluviales y la eficiencia del flujo del tráfico de camiones. Los

costos de desarrollo del sitio generalmente representan del 2 al 4% del costo total de una planta, pero pueden aumentar si se requiere un movimiento de tierra sustancial para el sitio. Las aguas pluviales deben controlarse para limitar los impactos de la escorrentía de las plantas en las aguas receptoras cercanas (arroyos, ríos y lagos). Pueden producirse copias de seguridad del tráfico (cola) si el sistema de carreteras de la planta no está configurado correctamente. El diseñador debe considerar todos estos problemas del sitio al evaluar diferentes sitios para la planta y al orientar la planta en el sitio seleccionado.

### **2.10.2 Recolección y entrega de desperdicios**

En el sistema de incineración, el manejo de la basura comienza con la entrega de materiales al sitio. La mayor parte de la basura se entrega al sitio en vehículos de motor y automóviles privados. Los vehículos de reparto pueden incluir camiones volquete abiertos y vehículos comerciales. Sin embargo, la mayoría de los desechos que se entregan a los lugares de incineración se transportan mediante camiones especializados con equipos de compresión y densificación. En algunos casos, se emplean remolques de camiones compactadores muy grandes (50-70 m<sup>3</sup>) para transportar la basura desde las estaciones de transferencia ubicadas en el centro hasta un incinerador distante. Estas estaciones de transferencia son atendidas por vehículos de recolección más pequeños.

### **2.10.3 Manejo y almacenamiento de desperdicios**

La basura es un material con propiedades físicas y mecánicas inusuales. A diferencia de muchos sólidos, no forma un cono cuando se apila y, a menudo, exhibe un ángulo de reposo negativo. Debido a su fuente y contenido de humedad, partes de los desechos pueden ser pegajosas; por lo tanto, es posible que no se descargue limpiamente de los transportadores de banda o plataforma.

Las formas físicas de los desechos incluyen polvos finos, a veces secos y polvorientos y, a veces, húmedos o incluso acuosos; serpentinas largas (por ejemplo, cintas de plástico); trozos de papel individuales que se mueven fácilmente y guías telefónicas pesadas y gruesas; latas, botellas y otros recipientes que lleven líquidos explosivos, tóxicos, corrosivos o inflamables; formas largas y resistentes, como barras de acero largas, tablones de madera gruesos o vigas; y materiales macizos, desde bloques de motor hasta muebles y colchones. Esta variabilidad enfatiza la necesidad especial de equipos de manipulación de materiales resistentes y flexibles.

#### **2.10.4 Control de tamaño y recuperación**

En algunas plantas, los desechos de gran tamaño o indeseables se controlan mediante la exclusión en el lugar de descarga o mediante la eliminación selectiva del foso por parte del operador de la grúa. Bajo supervisión, los artículos voluminosos pueden depositarse en un área específica del pozo o pueden llevarse directamente al sitio de disposición de residuos sin pasar por el horno incinerador. El último método se utiliza a menudo para artículos metálicos voluminosos como refrigeradores, estufas y piezas metálicas grandes (“electrodomésticos”) que contienen poco o ningún material combustible. Si el artículo contiene material biodegradable, se puede limpiar antes de llevarlo al sitio de eliminación de residuos. Los artículos combustibles de gran tamaño se rompen e incineran preferiblemente. La mayoría de la basura se puede reducir de tamaño cortándola o triturándola.

#### **2.10.5 Sistemas de alimentación del incinerador**

##### **2.10.5.1 Sistemas de alimentación para recepción y almacenamiento de vaciado al piso**

La mayoría de los sistemas de recepción y almacenamiento de vaciado de piso utilizan un cargador frontal para recuperar la basura de las pilas de almacenamiento y depositarla en tolvas de alimentación. Los cargadores frontales se operan continuamente para alimentar los desechos a los incineradores. El cucharón del cargador frontal debe tener la capacidad suficiente para llenar completamente la tolva de alimentación de desechos con una carga. La capacidad del cucharón debe tener un volumen mínimo de 1 m<sup>3</sup> para adaptarse a la dimensión máxima de los desechos típicos, pero debe tener un tamaño compatible con el tamaño de la unidad incineradora.

##### **2.10.5.2 Sistemas de alimentación para sistemas de recepción y almacenamiento de foso y grúas de combustión masiva**

Los sistemas de incineración masiva de diseño moderno casi siempre especifican la alimentación continua o semicontinua de desechos al horno de incineración. En plantas de combustión masiva más grandes, una tolva y un conducto de gravedad suministran un alimentador mecánico, como un pistón empujador. Los sistemas RDF utilizan un transportador mecánico o neumático para transportar la basura desde un búnker de almacenamiento y luego arrojan continuamente el RDF al horno usando un conducto barrido por aire y chorros de aire de alta presión.

### **2.10.6 Aire de combustión**

Para los incineradores con rejillas para soportar y/o transportar los desechos en combustión a través del horno, el "aire de combustión" generalmente incluye el suministro de aire debajo del fuego, aire sobre el fuego y aire secundario. Cada tipo de suministro de aire cumple una función especial dentro del sistema de combustión.

- Aire debajo del fuego. El aire debajo del fuego para sistemas de parrilla se define como el aire suministrado debajo de la superficie de la parrilla a través de varios plenums independientes (típicamente tres o cuatro) para proporcionar una distribución adecuada de la adición de aire a lo largo de la ruta de combustión.
- Aire sobre fuego. El aire de sobrecombustión puede definirse como el aire admitido por encima del lecho de basura en llamas en la parrilla. Por lo general, se admite en chorros de alta velocidad dirigidos para mezclar a fondo los gases combustibles que se elevan de la basura en llamas con el aire de combustión.
- Aire secundario. El aire secundario, agregado para el control de la temperatura, puede ser admitido a través de chorros de alta velocidad en las paredes laterales y el techo del gabinete del horno, ya sea cerca del extremo aguas arriba del horno primario o en la transición entre el horno primario y secundario.

### **2.10.7 Eliminación y manipulación de cenizas**

Los RSU incluyen materiales inertes que no se pueden destruir en el proceso de combustión. Además, el proceso de incineración es inherentemente imperfecto, por lo que algún material potencialmente combustible se seca, calienta y carboniza, pero no se logra el siguiente paso deseado (gasificación del carbón). Además, algunos materiales simplemente "caen entre las grietas" (tamices) y dejan el ambiente de combustión caliente sustancialmente sin quemarse. Estos tres componentes comprenden las cenizas de fondo, el residuo inevitable de las operaciones de incineración de RSU. Las cenizas de los incineradores municipales se caracterizan generalmente como:

- Ceniza de fondo: la ceniza que cae de la rejilla combinada con los tamices que caen por la rejilla.

- Ceniza volante: la ceniza fina que se transporta por el aire en la cámara principal y se deposita en los conductos y dispositivos del incinerador o, en última instancia, se convierte en la carga de entrada de material particulado al sistema APC.

#### **2.10.7.1 Propiedades de las cenizas**

La ceniza es variable, además, las características de las cenizas del incinerador están intrínsecamente relacionadas con las fuentes específicas y el carácter de los desechos que se alimentan al incinerador. Las propiedades físicas de la ceniza están íntimamente ligadas a las características del proceso de incineración. Los elementos dominantes son silicio, aluminio, hierro y calcio, tanto como el suelo normal. A partir de los elementos presentes en el "nivel porcentual", el material se parece mucho a un suelo arenoso o arcilloso, excepto por el alto contenido de hierro. Sin embargo, el contenido de metales pesados de las cenizas de fondo y, especialmente, las cenizas volantes presentan problemas de eliminación para algunos operadores de incineradores.

#### **2.10.8 Control de la contaminación ambiental**

Un incinerador es probablemente la mayor preocupación para un municipio debido al temor del impacto de la contaminación del aire en el medio ambiente contiguo. Esta área de la tecnología es inseparable de los problemas de combustión por el vínculo directo entre el proceso de combustión y muchos contaminantes del aire.

La contaminación del agua de los desagües y purgas del proceso y de la eliminación de residuos es un problema secundario en comparación con las emisiones al aire, pero aun así merece una consideración y un control cuidadosos. Además, un incinerador puede generar un ruido indeseable y hacer que el área circundante sea poco atractiva debido al tráfico de vehículos, la basura de los camiones recolectores y otras formas de basura, que desfiguran rápidamente un sitio de incineración.

##### **2.10.8.1 Contaminación del aire**

Las formas más notables de contaminación del aire son las cenizas volantes, el humo, los olores (de la chimenea y de otras áreas), los gases nocivos y el polvo. Todos emanan de un incinerador a veces.

Si se completa la combustión de la fracción volátil de los desechos, la composición del gas de combustión será principalmente nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono. Habrá pequeñas cantidades de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y ácidos minerales (principalmente ácido clorhídrico, que resultará de la combustión de plásticos halogenados, particularmente PVC). Si la combustión de los volátiles no es completa, los gases de combustión contendrán cantidades significativas de monóxido de carbono y otros materiales orgánicos no quemados o parcialmente quemados.

Los principales contaminantes del aire son:

1. Material particulado. El material particulado (caracterizado por la carga de peso de los gases de combustión), generalmente denominado cenizas volantes, se genera y se eluye en el proceso de combustión y debe eliminarse de los gases efluentes. La cantidad de material particulado que se genera depende en cierta medida del diseño y funcionamiento del incinerador. Si el proceso de combustión no se completa, se producirá una ceniza volante hollín.
2. Humo. Es predominantemente material combustible no quemado o parcialmente quemado (alquitrán o aerosol de hollín). Si el humo es un material de ceniza, el control requiere el uso de un equipo de control de emisiones de muy alta eficiencia. Puede reducirse hasta cierto punto mejorando el funcionamiento mediante el ajuste de la distribución de aire en el horno primario. Si el humo es combustible, la mejor manera de controlarlo es mejorando la eficiencia de la combustión. Un tiempo de residencia más prolongado, una mejor distribución del aire, la mezcla de gases y las altas temperaturas de funcionamiento eliminarán dicha contaminación.
3. Olor. Además de los olores que emanan de la chimenea debido a la mala combustión, hay olores en el pozo y en el área de manejo de residuos, particularmente, si se usa agua para apagar y purgar los tamices de la parrilla. Los olores también pueden emanar del vertedero de residuos. Los olores de la chimenea se pueden controlar mejor asegurando la combustión completa de los gases. Esto se logra mediante una distribución adecuada del aire, temperaturas elevadas y un tiempo de residencia adecuado a estas temperaturas. Dicho control es mucho más efectivo y menos costoso que el uso de equipos como depuradores para la eliminación de olores.

4. Polvo. Se emite desde el área del pozo cuando los camiones descargan y cuando la grúa está operando, desde el área de manejo de residuos y desde el área de manejo de cenizas volantes. El polvo que se levanta durante la descarga se puede controlar encerrando el área de vuelco y descargando el volumen del piso de vuelco hacia las tomas del ventilador de aire de combustión. Además, se pueden usar aerosoles para humedecer la basura en el pozo para minimizar el polvo durante la alimentación. En el área de manejo de cenizas se puede controlar usando rociadores para humedecer la ceniza.

#### **2.10.8.2 Contaminación del agua**

El agua se utiliza y se descarga inmediatamente de la mayoría de los incineradores. El agua se usa para lavar el pozo y los sistemas de manejo de cenizas, para apagar los residuos calientes y las cenizas volantes, para el control del polvo y para el enfriamiento y lavado de gases. El agua que se rechaza del incinerador probablemente se contaminará de una forma u otra. El agua tendrá una alta demanda biológica (DBO) y química (DQO) de oxígeno, DQO, y contendrán sólidos en suspensión y disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos. Dado que la cantidad de esta agua será relativamente pequeña, se puede descargar en un alcantarillado sanitario o en un sistema séptico. No debe descargarse en desagües pluviales o arroyos sin tratamiento.

#### **2.10.8.3 Contaminación acústica**

El ruido generado por el funcionamiento de un incinerador puede ser una molestia desagradable. Muchos camiones grandes están constantemente entregando y retirando material de la planta. Además, los grandes ventiladores, bombas y otros equipos suelen funcionar las 24 horas del día.

#### **2.10.9 Instrumentación y control**

La instrumentación y el control efectivos son fundamentales para lograr la excelencia en las operaciones de incineración. Estos sistemas mantienen la operación de la planta dentro de su diseño para lograr una producción de vapor alta y constante, alta disponibilidad de la planta y control de la corrosión, abrasión y otros procesos de degradación, con el quemado de cenizas deseado y con una operación consistente dentro de las regulaciones ambientales. Incluso si se dispone de una gran cantidad de mano de obra para la operación y el control manual, es imposible proporcionar una coordinación y supervisión oportuna y eficaz de las muchas variables operativas sin un grado mínimo de instrumentación y controles automáticos. Lo más

importante es que el control automático de la planta puede proporcionar una compensación rápida en las variables clave del proceso para hacer frente a los cambios en el contenido de humedad y la composición de los desechos.

#### **2.10.10 Operación**

Un tratamiento integral de los problemas operativos y desafíos de la incineración de residuos municipales introduce muchos temas nuevos. Además, lo "correcto" o "incorrecto" de muchas de las recomendaciones está sujeto a controversia ya que el elemento humano, los estilos de liderazgo, los efectos culturales y similares a menudo producen muchas respuestas buenas y viables a la misma pregunta. Sin embargo, es conveniente identificar los principales problemas operativos observados en las plantas existentes como indicaciones para el ingeniero de diseño de que es necesario prestar atención.

#### **2.10.11 Otros sistemas de incineración de desechos sólidos**

Los incineradores de desechos sólidos generalmente se clasifican de acuerdo con la naturaleza del material que están diseñados para quemar (es decir, desechos o desechos industriales). Sin embargo, a menudo se puede quemar más de un tipo de residuo en una unidad determinada. Los incineradores para la destrucción de desechos sólidos son la clase de incineradores más difíciles de diseñar y operar, principalmente debido a la naturaleza del material de desecho. Los desechos sólidos pueden variar ampliamente en composición y características físicas, lo que hace que los efectos de las velocidades de alimentación y los parámetros de combustión sean muy difíciles de predecir. Los equipos de manipulación de materiales, combustión y eliminación de residuos son más críticos, engorrosos, costosos y difíciles de controlar con estos que con otros tipos de incineradores (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

La incineración de desechos incluye las siguientes técnicas:

**Quema al aire libre.** La quema al aire libre es la técnica más antigua para la incineración de desechos. Básicamente consiste en colocar o amontonar materiales de desecho en el suelo y quemarlos sin equipo de combustión especializado. Este tipo de sistema produce humo excesivo y una alta emisión de partículas, y presenta un riesgo de incendio.

**Incineradores de cámara única.** Los incineradores de cámara única, en general, no cumplirán con los estándares de emisión de contaminación del aire que se han desarrollado durante los

últimos 10 a 15 años. Los desechos sólidos se colocan en la parrilla y se encienden. Al igual que con la quema al aire libre, se puede producir humo y emisiones excesivas de contaminación al aire.

**Incineradores a cielo abierto.** Se han desarrollado incineradores a cielo abierto para la incineración controlada de desechos explosivos, desechos que podrían crear un peligro de explosión o una liberación de calor elevado en un incinerador cerrado convencional. Están contruidos con una parte superior abierta y un número de boquillas muy espaciadas que soplan aire desde la parte superior abierta hacia la cámara del incinerador.

**Incineradores de cámaras múltiples.** En un intento por proporcionar una combustión completa de los productos de combustión y disminuir la carga de partículas transportadas por el aire en el gas de combustión que sale, se han desarrollado incineradores de múltiples cámaras. Se utiliza una cámara primera, o primaria, para la combustión de residuos sólidos. La cámara secundaria proporciona el tiempo de residencia y el combustible suplementario para la combustión de los productos gaseosos no quemados y los sólidos combustibles en el aire (hollín) descargados de la cámara primaria. Hay dos tipos básicos de incineradores de cámaras múltiples: los sistemas de retorta y en línea.

**Tecnología de horno rotatorio.** El incinerador de horno rotatorio es el más universal de los sistemas de eliminación de desechos térmicos. Puede utilizarse para la eliminación de una amplia variedad de residuos sólidos y lodos y para la incineración de residuos líquidos y gaseosos. El sistema de horno rotatorio ha encontrado aplicación en la incineración de residuos industriales y municipales. El sistema de horno incluye provisiones para alimentación, inyección de aire, el horno en sí, un postquemador y un sistema de recolección de cenizas (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

## **2.11 Incineración de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos**

Cuando se incineran desechos infecciosos, es importante mantener la integridad de los paquetes de desechos mientras se manipulan. Muchos sistemas de incineración prevén el manejo mecanizado de los desechos, como el uso de una cinta transportadora que mueve las cajas de desechos directamente al incinerador. Los sistemas que involucran el manejo de desechos sueltos no son aceptables porque brindan demasiado potencial para la creación de polvos y

aerosoles y para la exposición de los empleados; tales sistemas deben evitarse (Reinhardt & Gordon, 2018).

El cloruro de hidrógeno gaseoso y los óxidos de nitrógeno, que supuestamente contribuyen a la lluvia ácida, se liberan durante la incineración. El dióxido de carbono, un producto de la combustión de combustibles fósiles (es decir, gas, petróleo, carbón), así como los desechos, puede resultar en el calentamiento global. Sin duda, la contribución de estos contaminantes al medio ambiente por la incineración de desechos, y especialmente los desechos médicos, es minúscula en comparación con las emisiones de la quema de combustibles fósiles.

La incineración es una de las pocas formas racionales de tratar algunos desechos, como partes del cuerpo, tejidos de laboratorios de patología y cadáveres de animales. Con la ingeniería adecuada, la separación de fuentes, la capacitación exhaustiva del operador, la supervisión cercana, los dispositivos de control de la contaminación del aire y los procedimientos especiales de eliminación de cenizas, el impacto ambiental de un incinerador puede ser insignificante. Sin embargo, es probable que el costo de prácticas de incineración tan cuidadosas sea significativamente mayor de lo que muchas instituciones están experimentando en la actualidad (Reinhardt & Gordon, 2018).

En un incinerador, los productos químicos orgánicos (a base de carbono) de los desechos se volatilizan, oxidan y liberan a la atmósfera en forma de dióxido de carbono y agua. Los minerales, metales y materiales orgánicos sin quemar quedan en forma de ceniza, que pesa entre un 10 y un 30% (según el tipo de residuo) del peso del residuo sólido original. Las fuentes de material orgánico en los desechos incluyen agentes infecciosos, tejido animal, sangre, otros bioquímicos, papel y plásticos. Como todas las reacciones químicas, se requieren condiciones óptimas para una incineración eficiente. La incineración requiere cinco condiciones:

1. Oxígeno en cantidad suficiente para reaccionar completamente con todos los desechos (suministrado como aire a través de ventiladores).
2. Atomización y volatilización de los desechos en partículas y gases muy pequeños. Las reacciones solo pueden tener lugar en la fase gaseosa o en superficies que permitan que el oxígeno entre en contacto directo con los desechos.
3. Turbulencia y mezcla en el incinerador (para poner los desechos atomizados en contacto con el oxígeno).

4. Temperatura suficiente para volatilizar los desechos, soportar la condición de combustión autosostenida y permitir que las reacciones ocurran en un tiempo razonablemente corto.
5. Tiempo suficiente en estas condiciones para permitir que tenga lugar la reacción. El tiempo de retención es el tiempo que los desechos gaseosos pasan en las cámaras de combustión, sin incluir el tiempo necesario para la volatilización de los desechos (Reinhardt & Gordon, 2018).

Se comete el error de considerar sólo los requisitos de tiempo y temperatura para la incineración sin tener debidamente en cuenta los otros tres factores. Por ejemplo, la combustión con oxígeno insuficiente da como resultado una oxidación parcial y pirólisis. Se ha descubierto que los incineradores que funcionan según los estándares comúnmente citados (Tabla 2.1) en cuanto a tiempo y temperatura producen cenizas con desechos fácilmente reconocibles (sin tratar). A nivel molecular, las sustancias químicas que se forman en condiciones menos que óptimas se denominan productos de combustión incompleta (PIC) (Reinhardt & Gordon, 2018).

Tabla 2.1 Temperaturas de combustión de referencia estándar para incineradores de desechos infecciosos

<b>Cámara de combustión</b>	<b>Anterior</b>	<b>Más nuevo</b>
<b>Primaria</b>	1400-1600°F	1600-1800°F
<b>Secundaria</b>	1400-1600°F	1800+°F
<b>Cámara secundaria Tiempo de retención</b>	¼ a ½ segundos	1 a 2 segundos

Fuente: Reinhardt & Gordon, 2018.

### **2.11.1 Incineradores de Residuos Peligrosos biológico infecciosos**

La selección del incinerador más adecuado para la eliminación de un grupo de residuos peligrosos concreto es complicada, es necesario tomar en cuenta las propiedades de los residuos peligrosos, las limitaciones de las tecnologías, los límites permisibles de operación y la capacidad de tratamiento de la planta. A efectos de lograr una combustión eficiente la disponibilidad de oxígeno es esencial, utilizando cantidades superiores a los requerimientos teóricos. Los requerimientos de aire (oxígeno) dependerá del tipo de combustible y del horno (SEMARNAT, 2012).

Dentro de la amplia gama de compuestos que pueden estar presentes en los residuos peligrosos, algunos son compuestos orgánicos que se destruyen eficientemente a bajas temperaturas, sin embargo, otros constituyentes requieren de altas temperaturas para una combustión completa. Es así que los incineradores para residuos peligrosos son diseñados para que los gases de combustión alcancen temperaturas en el rango de 800° a 1600°C, con un tiempo de estancia de al menos 2 segundos. (SEMARNAT, 2012)

Existen varios tipos y diseños de incineradores desarrollados para el tratamiento de los diferentes residuos, contemplando en particular el estado físico de los mismos. Los sistemas de horno rotatorio y de inyección de líquidos son los más usados, pero hay muchas opciones. En la Tabla 2.2 se observan los sistemas de incineración más empleados en función del tipo de residuo a tratar:

Tabla 2.2 Aplicabilidad de las tecnologías existentes al tratamiento de residuos peligrosos y biológico infecciosos

<b>Técnica</b>	<b>Residuos Peligrosos</b>	<b>Residuos Biológico- Infecciosos</b>
<b>Horno de parrilla recíprocante</b>	No se aplica normalmente	Aplicado
<b>Horno de parrilla con movimiento transversal</b>	Raramente aplicado	Aplicado
<b>Horno de parrilla con sistema de oscilación</b>	Raramente aplicado	Aplicado
<b>Horno de parrilla con rodillos</b>	Raramente aplicado	Aplicado
<b>Horno de parrilla con enfriamiento por agua</b>	Raramente aplicado	Aplicado
<b>Horno de parrilla con cámara de rotación</b>	Raramente aplicado	Aplicado
<b>Horno rotatorio</b>	Ampliamente aplicado	Ampliamente aplicado
<b>Horno rotatorio enfriado por agua</b>	Ampliamente aplicado	Ampliamente aplicado
<b>Horno de corazón estático</b>	Aplicado	Ampliamente aplicado
<b>Horno estático</b>	Ampliamente aplicado	Aplicado
<b>Horno de lecho fluidizado-burbujas</b>	No se aplica normalmente	No se aplica normalmente
<b>Horno de lecho fluidizado-circulante</b>	No se aplica normalmente	No se aplica normalmente
<b>Horno de lecho fluidizado-rotatorio</b>	No se aplica normalmente	Aplicado
<b>Pirólisis</b>	Raramente aplicado	Raramente aplicado
<b>Gasificación</b>	Raramente aplicado	Raramente aplicado
<b>Plasma</b>	Raramente aplicado	Raramente aplicado

Fuente: SEMARNAT, 2012

### 2.11.2 Sistemas de incineración

Los incineradores de desechos infecciosos se suministran con varios nombres: incineradores de desechos médicos, infecciosos o patológicos. El 90% de los instalados durante las últimas dos décadas se denominan propiamente incineradores de aire controlado.

Los componentes físicos de un incinerador de aire controlado incluyen, en orden de proceso, una cámara de combustión primaria (a la que se alimentan los desechos), una cámara de combustión secundaria (para incinerar los gases que se han volatilizado de la cámara primaria) y una chimenea, para ventilar los gases de combustión. Si se utiliza un sistema de control de la contaminación del aire para eliminar partículas y gases ácidos, se instalan depuradores después de la cámara de combustión secundaria. Para recuperar el calor, se puede agregar una caldera después de la cámara secundaria y antes del lavador (Tabla 2.3). Las opciones para facilitar el rendimiento incluyen sistemas automatizados para la alimentación de desechos (por ejemplo, un ariete hidráulico) y la eliminación de cenizas (Reinhardt & Gordon, 2018).

Un incinerador de aire controlado normalmente opera con un flujo de aire restringido hacia la cámara principal (es decir, falta de aire). La temperatura de combustión de un incinerador de aire controlado se controla manipulando el suministro de aire; más aire aumenta la temperatura de funcionamiento. Debido a la falta de oxígeno, la cámara principal de un incinerador de aire controlado funciona para secar, calentar y volatilizar los desechos. La cámara primaria inicia el proceso de combustión, mientras que la cámara secundaria lo completa (Reinhardt & Gordon, 2018).

Tabla 2.3 Componentes de un incinerador de residuos infecciosos<sup>a</sup>

<b>Componente</b>	<b>Propósito</b>	<b>Cómo funciona</b>
<b>Cámara de combustión primaria</b>	<b>de</b> Secar, calentar y convertir los desechos en gases; puede ocurrir algo de oxidación y pirólisis.	Se usa combustible auxiliar (por ejemplo, gas natural) para elevar la temperatura de la cámara a 1600-1800° F para iniciar y mantener la combustión.
<b>Cámara de combustión secundaria</b>	<b>de</b> Oxidar los desechos gaseosos en dióxido de carbono y agua.	Con suficiente oxígeno presente (suministrado como aire), 1800° F y más convierte de manera eficiente los

		componentes orgánicos de los desechos en dióxido de carbono y agua.
<b>Caldera<sup>b</sup></b>	Recuperar calor de los gases de escape.	Un intercambiador de calor convierte el agua en vapor; el vapor se puede utilizar para calentar y enfriar.
<b>Dispositivos de control de contaminación del aire</b>	Eliminar el cloruro de hidrógeno, otros gases ácidos y partículas.	Un depurador se instala después de la cámara de combustión secundaria.
<b>Chimenea</b>	Dispersar los gases de escape.	Libera gases de escape de la cámara de combustión secundaria a una altura y ubicación que permite la dilución a concentraciones seguras.

<sup>a</sup>Típico de un incinerador de aire controlado de última generación. Listados en orden, desde la entrada de residuos hasta emisiones de gas.

<sup>b</sup>Opcional; puede ser necesario enfriar los gases de escape para fregar si no se utilizan.

Fuente: Reinhardt & Gordon, 2018.

Aunque algunos incineradores de desechos municipales pueden tratar de manera eficiente los desechos infecciosos, la mayoría de las instalaciones carecen de los procedimientos especiales de manipulación necesarios para los desechos infecciosos y, por lo tanto, requieren que dichos desechos se esterilicen antes de que sean aceptados.

De manera general las operaciones que se llevan a cabo en el proceso de incineración se describen en la Figura 2.2. Se pueden apreciar cinco subsistemas básicos: Recepción y pretratamiento, combustión, recuperación de energía, limpieza de gases y manejo de escorias y cenizas.

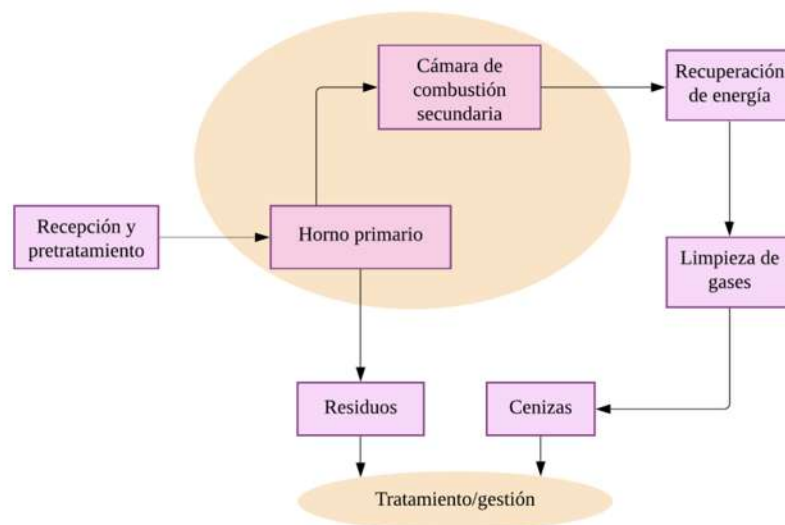


Figura 2.2. Proceso de incineración

Fuente: SEMARNAT, 2012

### **2.11.3 Controles ambientales**

El sistema APC (control de la contaminación del aire) utilizado con incineradores de desechos médicos está dirigido a tres clases de emisiones: (1) contaminantes combustibles como dioxinas / furanos, PNH aromáticos polinucleares y otros, COV generales y compuestos olorosos, (2) gases ácidos (particularmente ácido clorhídrico derivado de la combustión de plásticos de PVC) y (3) metales pesados con especial énfasis en mercurio, plomo y cadmio. Las emisiones atmosféricas son un poderoso problema regulatorio y de presión pública que ha afectado profundamente el número, el costo y la complejidad de los incineradores de desechos médicos en todo el mundo (Niessen, 2010).

### **2.12 Aspectos de la contaminación del aire de los procesos de incineración**

Las emisiones de contaminantes atmosféricos se han convertido en el foco de preocupación pública y el escrutinio reglamentario con respecto a las instalaciones de incineración. La fracción del costo de capital total de la instalación para los componentes del sistema dirigidos funcionalmente al cumplimiento de las limitaciones de emisión al aire es, para muchas plantas, más del 35% de la inversión total. En muchos casos, la concesión de permisos de contaminación del aire es el evento que marca el ritmo y el control en la implementación de instalaciones de incineración. Debido a estas realidades, quienes deseen construir y operar sistemas de incineración deben explorar y comprender las relaciones entre la cantidad y las características de las emisiones de contaminantes atmosféricos y:

- Las características químicas y físicas específicas de los desechos que se quemarán.
- Las características de diseño de la cámara de combustión.
- Las condiciones de funcionamiento en la cámara de combustión.
- El control efectuado por el (los) dispositivo (s) de control de la contaminación del aire (APC).

Hay muchos contaminantes atmosféricos emitidos por los procesos de combustión. El más básico es el material particulado inorgánico. El total de partículas suspendidas (TSP) es,

predominantemente, una "ceniza" relativamente inerte: una mezcla de compuestos benignos compuestos principalmente de silicio, aluminio, calcio, hierro, aluminio y oxígeno. Sin embargo, esta parte de las emisiones de la cámara de combustión también incluye los “metales pesados” de plomo, mercurio, cadmio, arsénico y otros elementos que pueden tener efectos tóxicos, cancerígenos y otros efectos sobre la salud importantes.

### **2.12.1 Material particulado**

Las características importantes de las partículas incluyen tamaño, distribución de tamaño, forma, densidad, pegajosidad, corrosividad, reactividad y toxicidad. De estos, la distribución del tamaño de partículas (PSD) tiene el impacto más importante en APC. La PSD se puede expresar como un recuento de partículas y como una distribución de masa. Más comúnmente, la mayor masa está asociada con las partículas más grandes, pero la mayor cantidad de partículas, el impacto visual (opacidad debido a la dispersión de la luz), el área de la superficie, el impacto en la salud y la dificultad de captura se encuentran con las partículas más pequeñas.

### **2.12.2 Tóxicos del aire**

El nombre "tóxicos del aire" se ha aplicado a un espectro de compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentran en las emisiones de las chimeneas. La EPA de EE. UU. Define los tóxicos del aire como contaminantes que se sabe o se sospecha que causan problemas de salud graves, como cáncer o defectos de nacimiento. En muchos (si no la mayoría) de los casos, la concentración de estos compuestos en los gases de chimenea es pequeña: son “micro contaminantes”. Por lo tanto, después de la dispersión y dilución de los gases de chimenea por la atmósfera, las concentraciones promedio de aire ambiental resultantes y las consecuencias de riesgo para la salud inferidas asociadas son a menudo aceptables. Sin embargo, dado que estos contaminantes están directamente relacionados con los efectos en la salud humana, reciben una atención especial tanto por parte de las agencias reguladoras como del público en general.

La incineración de desechos se considera, como era de esperar, como una importante fuente potencial de emisiones de sustancias tóxicas al aire. Esto se debe al hecho de que, al ser quemado con diversos desechos, la contaminación por metales traza (algunos de ellos tóxicos) es ciertamente posible, si no probable.

## **2.13 Control de la contaminación del aire para sistemas de incineración**

El proceso de selección de una tecnología APC (control de contaminación de aire) óptima es complejo. Definir el significado de "óptimo" requiere la consideración de varios criterios técnicos, económicos y de otro tipo. Estos criterios incluyen lo siguiente:

- Eficiencia de eliminación de contaminantes (en relación con todos los contaminantes regulados y prestando atención a la generación potencial de nuevos contaminantes en el curso de la reducción de otros)
- Inversión de capital a incluir
- Impacto en la disponibilidad (confiabilidad) y la capacidad del incinerador
- Costo operativo a incluir
- Compatibilidad con limitaciones de diseño

### **2.13.1 Opciones de equipo para incinerador APC**

#### **2.13.1.1 Cámaras de sedimentación**

Una cámara de sedimentación es una cámara o zona distinta en la que se reduce la velocidad del gas para permitir que se produzca la sedimentación por gravedad de las partículas. La captura de partículas por sedimentación es sensible a la reincorporación, por lo que las cámaras de sedimentación a menudo se diseñan con un fondo húmedo en el que se usa una esclusa de agua para atrapar y transportar sólidos. Claramente, las cámaras de sedimentación no son muy eficientes y su aplicabilidad en las plantas modernas es nula como medio para cumplir con las regulaciones de emisiones.

#### **2.13.1.2 Ciclones y colectores inerciales**

"Ciclón" denota el miembro más común de una familia de dispositivos de control de partículas que dependen de las fuerzas de inercia para eliminar materiales en partículas masivos relativamente grandes de una corriente de gas. La eficiencia de eliminación de un ciclón está relacionada con la velocidad angular alcanzada en la zona de flujo vortical dentro del separador ciclónico. A medida que aumenta la velocidad de rotación dentro del dispositivo, las partículas progresivamente más pequeñas alcanzan el área de recolección en la pared exterior y son capturadas. El conducto de entrada a menudo se adapta (una entrada tangencial, helicoidal o

involuta) y/o se utilizan paletas internas para facilitar la aceleración y desaceleración del vórtice con el fin de minimizar las pérdidas de presión.

### **2.13.1.3 Depuradores húmedos**

Los depuradores húmedos incluyen una amplia clase de dispositivos APC con, a menudo, una doble funcionalidad: eliminación de PM y absorción de uno o más contaminantes gaseosos. El enfriamiento y la humidificación del gas que tienen lugar en un lavador húmedo pueden ser efectos secundarios importantes (y, a veces, indeseables). El enfoque del diseño depende del escenario regulatorio y de la contaminación de los gases de combustión. Aunque los depuradores húmedos pueden ser eficaces en la eliminación de partículas y gases, su funcionamiento introduce un residuo de proceso (una descarga acuosa) que necesita una alcantarilla o una corriente receptora. Este nuevo efluente puede requerir monitoreo y/o tratamiento y es casi seguro que requiere un permiso. Estas desventajas a menudo fomentan el uso de recolectores secos como alternativa preferida.

Los depuradores húmedos destinados a la recolección de partículas se dividen en cinco grupos:

1. Depuradores venturi
2. Depuradores asistidos mecánicamente
3. Depuradores con bomba
4. Depuradores con filtro húmedo
5. Depuradores con bandeja y tamiz

### **2.13.1.4 Precipitadores electrostáticos**

#### ***Sistemas ESP seco***

El ESP utiliza fuerzas eléctricas para mover PM en una corriente de gas que fluye a una superficie colectora. Las partículas se cargan eléctricamente al pasar a través de una corona: una región caracterizada por un resplandor azul luminoso dentro del ESP que contiene una alta concentración de iones gaseosos. En una corona se pueden generar iones o electrones positivos o negativos, pero, para las operaciones de limpieza de gases industriales, la corona negativa se utiliza con mayor frecuencia. El proceso de carga es más efectivo con partículas grandes, ya que barren un área de sección transversal proporcionalmente más grande y acumulan más electrones a medida que pasan a través de la región de corona. Lo contrario puede reducir la eficiencia del

ESP: carga inadecuada de partículas con altas concentraciones de partículas submicrónicas que conducen a una "extinción de carga espacial" (altos voltajes con corrientes bajas)

### ***Sistemas ESP húmedos***

Los precipitadores electrostáticos húmedos (WESP) eliminan las partículas de polvo acumuladas mediante la irrigación continua o periódica de las placas de recolección con rociadores de agua o una película de agua. En la práctica se encuentran diseños tanto de placa plana como tubulares. Dado que el polvo está mojado, el re-arrastre no es un problema. A menudo, se utilizan rociadores de agua aguas arriba del WESP para llevar los gases al punto de saturación. El agua no evaporada del preacondicionamiento puede tratarse por separado del sistema de tratamiento de aguas residuales primario WESP o puede pasarse para su uso como agua de riego de placas en el propio WESP.

#### **2.13.1.5 Filtro de tela (Cámara de filtros)**

La filtración es un medio muy eficaz para eliminar partículas finas de una corriente de gas. La eficiencia de eliminación sigue siendo alta en comparación con la mayoría de las otras tecnologías de control de partículas submicrónicas. Esta es la fracción de partículas que es de especial importancia en las emisiones de partículas respirables (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y de muchos aerosoles orgánicos cancerígenos y tóxicos y metales pesados. Por lo tanto, no es sorprendente que el uso de dispositivos basados en filtración en aplicaciones de incineración haya crecido significativamente a medida que las regulaciones se han vuelto cada vez más estrictas. Los dispositivos de filtración son de dos tipos: de tela y filtros de fondo o de lecho. Los FF se encuentran generalmente como una serie de bolsas cilíndricas largas montadas en una estructura (una "cámara de filtros"). Los filtros de lecho pueden ser de varios tipos, pero, en las aplicaciones de incineración, suelen ser un lecho lleno y profundo (un filtro de "lecho de grava").

#### **2.14 Enfoques para la selección y diseño de incineradores**

La selección de un sistema de gestión de residuos requiere la consideración de muchos factores (técnicos, económicos, políticos, etc.). Las decisiones son, con razón, responsabilidad del propietario o propietario/operador final del sistema, pero a menudo el ingeniero es un participante activo. A menudo, los factores de costo dominan en estas decisiones, aunque

cuestiones menos cuantitativas como permitir la incertidumbre, los impactos del reciclaje obligatorio y la aceptación de la comunidad son cada vez más importantes. Además, la flexibilidad del sistema para hacer frente tanto al carácter cambiante de los residuos como al endurecimiento de los requisitos reglamentarios es fundamental para la viabilidad a largo plazo.

#### **2.14.1 Caracterizar los residuos**

Utilizando los métodos y precauciones para obtener la mejor caracterización práctica de la cantidad, composición y características críticas del residuo. Tener en cuenta el crecimiento futuro y el impacto de los cambios en la tecnología, las regulaciones y la economía en los requisitos operativos.

#### **2.14.2 Diseñar el sistema en bloques**

Con demasiada frecuencia, las instalaciones de incineración se desarrollan en piezas sin prestar suficiente atención al apareamiento de interfaces entre varios elementos. Recuerde el concepto de sistema. Esto es particularmente importante en lo que respecta a las instalaciones de manipulación de materiales.

#### **2.14.3 Establecer objetivos de desempeño**

Revisar los requisitos reglamentarios actuales y que pronto se promulgarán (o harán cumplir) para la calidad del efluente. Evaluar las necesidades de reducción de volumen y agotamiento o desintoxicación de residuos.

#### **2.14.4 Desarrollar equilibrios térmicos y materiales**

Determine los flujos de material y energía en los desechos, el aire de combustión y los gases de combustión utilizando las técnicas desarrolladas al principio de este libro. Considere los materiales de construcción probables y establezca límites razonables de temperatura. Explore el impacto de las variaciones de la composición y cantidad de alimento de desecho "promedio". En la práctica, estas características fuera de la media caracterizarán mejor las condiciones operativas diarias. Utilice herramientas y técnicas analíticas en la mayor medida razonable. Los lápices son mucho más baratos que el hormigón y el acero.

#### **2.14.5 Desarrollar la envolvente del incinerador**

Establecer el tamaño total del sistema usando tasas de liberación de calor por unidad de área y por unidad de volumen, etcétera. Utilice la velocidad de combustión, la longitud y la forma de la llama, las expresiones cinéticas y otras herramientas de análisis para establecer la envolvente básica del incinerador.

#### **2.14.6 Evaluar la dinámica del incinerador**

Aplique la metodología de evaluación de chorro y quemador, cálculos de flotabilidad, relaciones empíricas y herramientas de evaluación de caída de presión y tiro de horno convencional para comprender, aunque de manera inadecuada la dinámica del sistema.

#### **2.14.7 Desarrollar los diseños de equipos auxiliares**

Decida los tamaños y requisitos de los quemadores, ventiladores, rejillas, sistemas de manipulación de materiales, bombas, compresores de aire, sistemas de control de la contaminación del aire y muchos otros equipos auxiliares que componen el sistema. La regla fundamental en el diseño final es prepararse para cuando “eso” suceda, no especular sobre si “eso” sucederá.

#### **2.14.8 Desarrollar la economía del incinerador**

La incineración es a menudo el enfoque de mayor costo para la gestión de desechos. En consecuencia, la comprensión de la economía de la incineración es una parte importante de la toma de decisiones de ingeniería y gestión.

#### **2.14.9 Construir y operar**

En muchos casos, afortunadamente, la naturaleza es amable: los diseños de ingeniería razonables funcionarán, aunque quizás no de acuerdo con las expectativas. A veces, las plantas construidas con el análisis y el cuidado más detallados dan como resultado problemas que continúan durante toda la vida útil de la instalación. La incineración implica cierto riesgo. Esa es la gran cantidad de trabajadores en el complejo, pero fascinante campo de la combustión de residuos industriales y municipales.

# CAPÍTULO 3    CONCEPTUALIZACIÓN

---

---

## 3.1.1    Pregunta de investigación

¿Cuál es el impacto ambiental derivado de la incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos al incrementar la eficiencia en sus procesos?

## 3.1.2    Hipótesis

El cambio climático es el principal impacto ambiental provocado por la incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos, esto a causa de la emisión de gases contaminantes provenientes de la quema del combustible fósil.

Por lo tanto, proponer alternativas que permitan que sus procesos sean más eficientes disminuirá los impactos ambientales.

## 3.1.3    Objetivos

### 3.1.3.1    Objetivo general

Determinar el impacto ambiental y los *hotspots* dentro del proceso de incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos en una planta incineradora.

### 3.1.3.2    Objetivos específicos

- Conceptualizar el problema de investigación.
- Identificar los impactos significativos del proceso de incineración.
- Plantear las medidas para la mejora del proceso.

## 3.1.4    Justificación

Existen pocos estudios a nivel mundial de análisis de ciclo de vida o de manufactura esbelta, aplicados a sistemas de gestión de residuos y no existe ninguno enfocado a la incineración de

residuos peligrosos biológico infecciosos. En México hasta el momento no hay estudios que reporten la aplicación del análisis de ciclo de vida y *lean Green* a la de incineración de RPBI, y se ignora por completo la aplicación de modelos de gestión de residuos que pueden aportar una mejora constante a un programa de disminución de residuos. De ahí la importancia de un trabajo como este, ya que nunca se ha hecho algo parecido y mucho menos se ha aplicado la hibridación de los dos métodos.

La presente investigación se enfocará en aplicar las dos metodologías al proceso de incineración de RPBI. Con el fin de identificar, cuantificar y evaluar, los posibles impactos ambientales resultantes. Con esto, se tendrá una herramienta para proponer estrategias enfocadas a una disminución del impacto ambiental.

# CAPÍTULO 4 PLAN DE TRABAJO

---

**Etapa 1.** Preparación conceptual del problema de investigación.

**Etapa 2.** Aplicar el análisis de ciclo de vida-impactos ambientales.

Actividad 1. Entender el proceso de análisis de ciclo de vida.

Actividad 2. Generar el modelo mediante análisis de ciclo de vida.

**Etapa 3.** Aplicar *Lean*-mejora del proceso.

Actividad 1. Elección de la metodología Lean

Actividad 2. Entender el proceso de mapeo de flujo de valor (VSM)

Actividad 3. Generar el estado actual de VSM

Actividad 4. Generar el estado futuro de VSM

## 4.1 Metodología

Se medirán los impactos al ambiente de la generación e incineración de RPBI mediante el uso de *Lean Green*.

Empezando por realizar un Análisis de Ciclo de Vida.

Inicialmente se aplicará la fase de definición del objetivo y el alcance, seguido de la recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del proceso, para después realizar la fase de análisis del inventario, seguido de la fase de evaluación de los impactos medioambientales con respecto al inventario de entradas y salidas, y se analizarán los resultados en la fase de interpretación.

Se aplicará la metodología *Lean* mediante el uso de mapas de flujo de valor para reducción de desperdicios e impactos al medio ambiente a través de la mejora del sistema.

# CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

---

---

## 5.1 Concepto de Análisis de ciclo de vida

El concepto de evaluación del ciclo de vida es evaluar los efectos ambientales asociados con cualquier actividad dada desde la recolección inicial de materia prima de la tierra hasta el punto en el que todos los residuos se devuelven a la tierra. Este concepto, a menudo es denominado evaluación “de la cuna a la tumba” (Vigon, Tolle, & Latham Batelle-Columbus, 2000).

Durante los últimos años, las cuestiones ambientales han ganado un mayor reconocimiento público. El público en general se ha vuelto más consciente de que el consumo de productos manufacturados y servicios comercializados, así como las actividades diarias de nuestra sociedad, afectan negativamente el suministro de recursos naturales y la calidad del medio ambiente. Estos efectos ocurren en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, comenzando con la adquisición de materia prima y continuando a través de la fabricación de materiales y la fabricación del producto. También ocurren durante el consumo de productos y una variedad de opciones de gestión de residuos, como el vertido, la incineración, el reciclaje y el compostaje. A medida que ha aumentado la preocupación del público, tanto el gobierno como la industria han intensificado el desarrollo y la aplicación de métodos para identificar y reducir los efectos ambientales adversos de estas actividades (Vigon, Tolle, & Latham Batelle-Columbus, 2000).

La evaluación del ciclo de vida adopta un enfoque holístico al analizar el ciclo de vida completo de un producto, proceso, paquete, material o actividad. Las etapas del ciclo de vida abarcan la extracción y procesamiento de materias primas: fabricación, transporte y distribución; uso/reutilización/mantenimiento; reciclaje y compostaje; y disposición final. No es la intención de una evaluación del ciclo de vida analizar los factores económicos. Se puede utilizar una evaluación del ciclo de vida para crear escenarios sobre los cuales se podría realizar un análisis de molde (Vigon, Tolle, & Latham Batelle-Columbus, 2000).

## 5.2 Estructura de ACV según ISO

Hasta la fecha, la estructura desarrollada por SETAC ha sido esencialmente mantenida por ISO con la excepción de la Evaluación de Mejoras, que fue reemplazada por Interpretación. La optimización de los sistemas de productos no fue adaptada como contenido estándar por ISO, pero se incluyó junto con otras aplicaciones de la norma. La estructura del estándar internacional se muestra en la figura 5.1 (Klopffer & Grahl, Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practice, 2014).

Las fases de la LCA han cambiado de nombre, en comparación con las estructuras anteriores, y los siguientes términos ahora son obligatorios a nivel internacional:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis de inventario de ciclo de vida
- Evaluación del impacto del ciclo de vida
- Interpretación

Las flechas en la Figura 5.1 permiten un enfoque iterativo que a menudo es necesario. Las aplicaciones directas de un ACV quedan fuera del alcance de los componentes estandarizados de un ACV. Esto tiene sentido porque, además de las aplicaciones previsibles durante el proceso de normalización, otras se desarrollaron en la práctica y se han resumido como “otras aplicaciones” (Klopffer & Grahl, 2014).

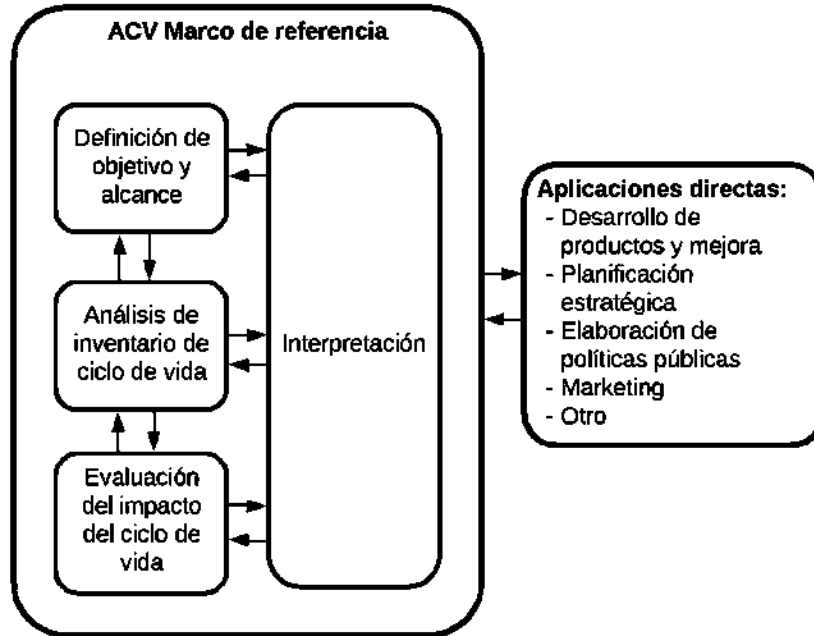


Figura 5.1. Marco de referencia ACV

Fuente: Klopffer & Grahl, 2014

Una característica fundamental del ACV frente a otras metodologías de evaluación ambiental, es el análisis de un sistema en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción y procesamiento de las materias primas hasta la disposición de los productos considerando sus efectos sobre todo el medio ambiente circundante, por ejemplo, sobre el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, etc., (Sánchez, Cardona, & Sánchez, 2007).

### 5.2.1 Definición de objetivo y alcance

Es la primera fase de un ACV, que establece el objetivo de un estudio de ACV previsto, la unidad funcional, las alternativas del sistema consideradas y la amplitud y profundidad del estudio de ACV, en relación con este objetivo (Klopffer & Grahl, 2014).

La definición del objetivo es una declaración realizada por la organización (como empresas, asociaciones industriales o comerciales, oficinas ambientales, ONG, etc.) que encarga una ACV, proporcionando una explicación a lo siguiente: ¿Cuál es el objetivo del estudio?, ¿Por qué se realiza el estudio?, ¿Para quién se realiza el estudio? (Klopffer & Grahl, 2014).

En el paso de definición del alcance se establecen las principales características de un estudio de LCA previsto, que cubren cuestiones como la cobertura temporal, geográfica y tecnológica, el modo de análisis empleado y el nivel general de sofisticación del estudio (Guinée, 2004).

### **5.2.2 Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)**

Esta fase se ocupa de la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido y de los procedimientos de recopilación y cálculo de datos asociados y es esencialmente un inventario de datos de entrada/salida con respecto al sistema en estudio. El objetivo es, por tanto, preparar un inventario, primero cualitativo y luego cuantitativo de todos los procesos involucrados en el ciclo de vida del producto o sistema en estudio, detallando todas las interacciones relevantes con el entorno. El análisis de inventario es generalmente la fase que consume más tiempo y recursos de una LCA (Guinée, 2004).

El inventario del ciclo de vida es una “instantánea” de las entradas y salidas de un sistema. Se puede utilizar como herramienta técnica para identificar y evaluar oportunidades para reducir los efectos ambientales asociados con un producto, proceso de producción, paquete, material, o actividad. Esta herramienta también se puede utilizar para evaluar los efectos de los recursos de las opciones de gestión de recursos diseñadas para crear sistemas sostenibles. Los inventarios del ciclo de vida pueden ser utilizados tanto internamente por las organizaciones para respaldar las decisiones en la implementación de mejoras de productos, procesos o actividades como externamente para informar a los consumidores o las decisiones de política pública. Se espera que los usos externos cumplan con un estándar más alto de responsabilidad en la aplicación de la metodología (Vigon, Tolle, & Latham Batelle-Columbus, 2000).

### **5.2.3 Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)**

La tercera fase tiene como objetivo comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema de productos a lo largo del ciclo de vida del producto, se define como un proceso cuantitativo y/o cualitativo para identificar, caracterizar y evaluar los impactos potenciales de las intervenciones ambientales identificadas en el análisis del inventario (Guinée, 2004).

Los expertos de un grupo de trabajo del simposio SETAC Europe LCA en Leiden (diciembre de 1991) sugirieron la siguiente lista, que se suponía cubría con la menor superposición posible

los problemas ambientales reconocidos más importantes. Hasta la fecha, todavía representa la base de la mayoría de las listas de categorías (Klopffer & Grahl, Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practice, 2014).

- Recursos renovables escasos
- Recursos no renovables (materia prima)
- Calentamiento global
- Agotamiento del ozono
- Toxicidad humana
- Toxicidad ambiental
- Acidificación
- Eutrofización
- Descarga de DQO
- Formación de foto oxidantes
- Requerimiento de espacio
- Molestia (olor, ruido)
- Calor residual
- Seguridad Ocupacional
- Residuos sólidos finales (peligrosos)
- Residuos sólidos finales

La forma de EICV viene dada por la ISO 14040 revisada en una lista de elementos obligatorios y opcionales:

A) Elementos obligatorios

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- Asignación de resultados ICV (clasificación)
- Cálculo de los resultados del indicador de categoría (caracterización)
- Resultados del indicador de categoría

B) Elementos opcionales

- Cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría en relación con la información de referencia (normalización)
- Agrupamiento
- Ponderación

El primer elemento obligatorio ya debería existir en la definición de objetivo y alcance, pero tiene que ser refinado ahora. También los resultados de ICV deberían haberse producido en la segunda etapa con respecto a las categorías de impacto seleccionadas (clasificadas), nuevamente las decisiones finales se tomarán ahora. La caracterización es un elemento de evaluación de impacto genuino y requiere conocimiento de la interrelación entre liberaciones al medio ambiente o extracciones del medio ambiente y los impactos potenciales de las liberaciones y extracciones. En la práctica, sin embargo, los profesionales seleccionan métodos bien establecidos, muchos de los cuales están disponibles en el software. Los métodos deben ser aceptados internacionalmente (Klopffer, 2014).

Entre los elementos opcionales, la “normalización” se utiliza con mayor frecuencia. Los resultados de este elemento permiten eliminar los impactos que contribuyen sólo marginalmente al daño ambiental en la región en cuestión. La ponderación del elemento no se utilizará en los estudios de ACV destinados a afirmaciones comparativas destinadas a ser divulgadas al público. En contraste con la agrupación según similitudes (cualitativas) en el patrón de resultados, la ponderación tiene como objetivo la agregación cuantitativa de los resultados utilizando factores de ponderación. El resultado puede ser un solo número que podría ser mal utilizado, de ahí el veredicto de ISO (Klopffer, 2014).

#### **5.2.4 Interpretación**

Es la fase final de ACV y se define como un procedimiento sistemático para identificar, calificar, verificar y evaluar información de los resultados del ICV y/o EICV de un sistema de producto, estos se resumen y discuten como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con la definición de objetivo y alcance (Guinée, 2004).

El principal objetivo de la Interpretación es formular las conclusiones que se puedan extraer del ACV, además este es el lugar de reflexión sobre los resultados de las fases previas del ACV y sobre las elecciones que se han realizado durante todo el proceso de generación de estos

resultados. Sin embargo, debe quedar claro que la interpretación, por muy completa que sea, nunca puede reemplazar una revisión externa e interactiva por pares. Se recomienda encarecidamente dicha revisión por pares, a menos que el estudio sea explícitamente sólo para uso interno.

# **CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ESTUDIO DE CASO: INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS BIOLÓGICO INFECCIOSOS**

---

---

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo general determinar el tipo de impacto significativo ocasionado por la incineración de RPBI en una planta incineradora ubicada en el municipio de Oaxaca de Juárez, mediante la aplicación de ACV.

## **6.1 Proceso de incineración de RPBI en la planta incineradora en Oaxaca de Juárez**

El proceso de incineración dentro de la planta es llevado a cabo como se muestra en la Figura 6.1, a continuación, se describe lo que ocurre dentro de estos pasos:

- **Recolección y transporte de RPBI.** Los residuos son recolectados directamente de las tres unidades hospitalarias pertenecientes a la ciudad de Oaxaca, serán recolectados en el transporte adecuado durante 5 días por semana y serán transportados hasta el lugar de la planta incineradora.
- **Recepción y almacenamiento de residuos.** Seguido de la recolección, los residuos serán almacenados si así se requiere, esto dependerá de la cantidad de residuos con la que se cuente. Para el almacenamiento se contará con una cámara refrigeradora a una temperatura máxima de 4°C.
- **Preparación para la incineración.** Este proceso debe realizarse antes de la incineración de los residuos, consiste en depositar los residuos en la tolva principal de incineración, este proceso se lleva a cabo por personal capacitado y es un proceso semiautomático, con el fin de evitar cualquier contacto físico directo.
- **Incineración.** Después de que los residuos sean colocados en la tolva se procede a llevar a cabo la incineración. Para llevar a cabo la incineración de los residuos es necesario

contar con un horno que mantenga una temperatura arriba de 1000°C en la cámara principal.

- Lavadora de gases. Acoplado al incinerador se encontrará un lavador de gases con una capacidad de 350 kg/h y al que pasarán los gases provenientes de la incineración. Por otro lado, en este proceso de lavado de gases está entrando agua.
- Disposición de cenizas. Las cenizas que se generen por la incineración de los residuos, serán depositadas en el relleno sanitario, ya que son cenizas inertes.
- Monitoreo y control de emisiones. Dentro del proceso se emitirán ciertas emisiones a la salida, pero debido al acoplamiento del lavador de gases los contaminantes se precipitarán y se emitirá a la atmósfera únicamente vapor de agua.
- Lavado de contenedores. Se tendrá que lavar los contenedores donde son recolectados los residuos y las tolvas donde son colocados dentro de la planta.

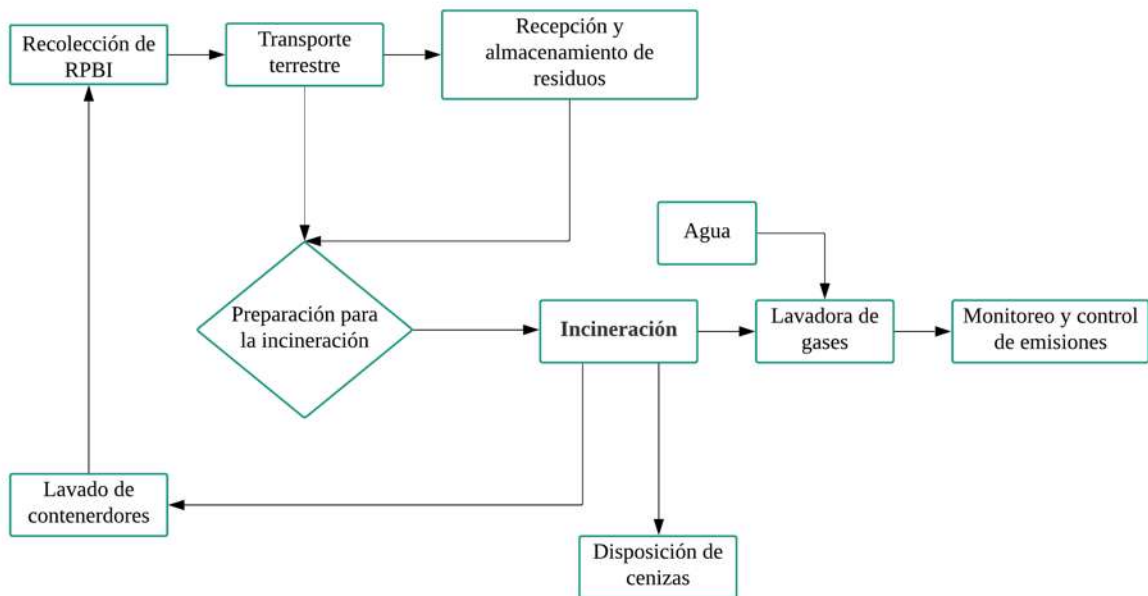


Figura 6.1. Proceso de incineración de RPBI

### 6.1.1 Balance de materia y energía

Como parte del proceso de incineración, se realizó un balance de materia y energía, este se desglosa por completo en el ANEXO I, con la finalidad de contabilizar la cantidad de energía

requerida para incinerar los RPBI en el proceso de incineración. Para la realización del balance de materia se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

- Se tomó en cuenta una combustión con exceso de aire para que se lleve a cabo la combustión completa.
- La eficiencia del incinerador se estimó del 98% de acuerdo a la información proporcionada de ficha técnica de proveedor.
- Se consideró una entrada de RPBI de 1000 kg/día, con un estimado del 2% de cenizas al final del proceso, por lo que se obtiene un total de 20 kg de cenizas por día.
- El combustible utilizado es gas LP compuesto de 60% propano ( $C_3H_8$ ) y 40% butano ( $C_4H_{10}$ ).
- Se consideró la composición del aire 79% nitrógeno ( $N_2$ ), 21% oxígeno ( $O_2$ ) y se propuso un exceso de aire ( $O_2$ ) de 120%.
- Se propuso una conversión para las reacciones completas e incompletas de 60% y 40% respectivamente. Por lo que se tendrían salidas de propano, butano, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua, monóxido de carbono y nitrógeno.

Para el balance de energía se propuso una alimentación de residuos a 50°C y 300°C al término del proceso, considerando una presión ambiental en el sistema. Se determinaron las entalpías específicas de cada compuesto tomando un estado de referencia para el gas a 25°C y 1 atm. Con lo que se pudo determinar el calor desprendido.

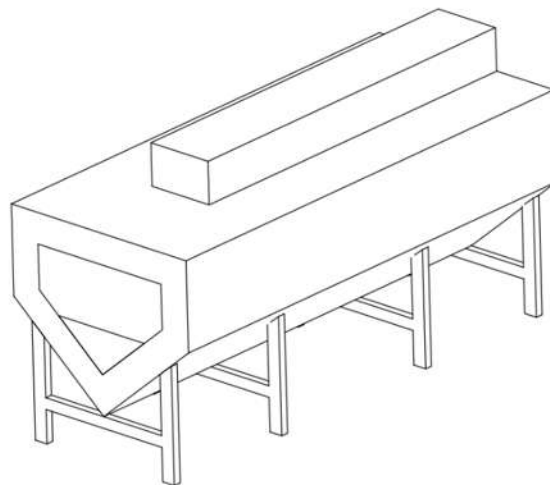


Figura 6.2. Horno incinerador

## **6.2 Generación de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos en México por sector salud público**

Cabe mencionar que antes de realizar el inventario de ciclo de vida, se realizó una recopilación de información de la generación de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI) en México por sector salud público, con la finalidad de comprender en profundidad la cantidad aproximada de RPBI que se generan en el país. Cabe mencionar que la generación de RPBI va de acuerdo con la clasificación de los generadores, ya sean Nivel I, Nivel II, Nivel III, descritos en el capítulo 1. De acuerdo a esto, algunas unidades hospitalarias pertenecientes al sector salud público son las de mayor generación de RPBI.

A continuación, se muestra en la Tabla 6.1 la generación de residuos peligrosos biológico infecciosos, de acuerdo a esta la generación máxima aproximada de RPBI en México en un periodo de tiempo del año 2019-2021, es de 3,634.23 toneladas por mes. Los datos presentados en la tabla se obtuvieron de las licitaciones publicadas que se encuentran en la plataforma del [COMPRANET](#) y solo se incluye al sector salud público.

Los datos presentados de cada entidad federativa son el resultado de una sumatoria de todas las unidades médicas de los institutos del IMSS e ISSSTE. Cabe mencionar que en la tabla no se están incluyendo instituciones que ofrecen servicios de salud como SEDENA, PEMEX, FGR y otras instituciones generadoras.

Para obtener las sumatorias de la generación de RPBI de las Secretarías de Salud y los Servicios de Salud (SESA) estatales, se sumó la producción de residuos por mes de cada una de las unidades médicas de algunas de las entidades, ya que varias de estas no cuentan con información disponible de la cantidad de residuos generados por los servicios de salud estatales.

Los datos obtenidos para las sumatorias de los residuos generados por cada institución se tomaron de un periodo de tiempo del año 2019 a 2021. Y es importante mencionar que los datos obtenidos para los estados de Baja California y Baja California Sur, son del año 2014 y 2016 respectivamente, ya que no se obtuvo información más actualizada.

Tabla 6.1. Generación aproximada mensual de RPBI en México por Sector Salud Público Año 19-21

Entidad federativa		IMSS		ISSSTE		Secretaria de salud y SESA	
		Generación mensual de RPBI kg		Generación mensual de RPBI kg		Generación mensual de RPBI kg	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Aguascalientes	5680.6	9954.8	---	---	27640	69100
2	Baja California*	7954	19795	1127.6	2819	5452.4	13631
3	Baja California Sur*	1817	4529	---	---	2457	2948
4	Campeche	1402	3504	1425	---	---	---
5	Chiapas	5148.6	9502.5	---	8601	22120	55300
6	Chihuahua	3600	9000	1600	4000	4760	11879
7	Coahuila	12703.38	21452.01	2224	5564	---	13946
8	Colima	1549.9	3874.9	751	1212	---	---
9	Ciudad De México	8366.6	15396.5	4200	10500	80142.6	215675.6
10	Durango	1378	3444	---	3253.6	---	9978.29
11	Guanajuato	12107.4	25172.9	8824	13236	---	---
12	Guerrero	3714	9285.75	2740.2	4567.2	5281	13184
13	Hidalgo	4605	9209	1666.6	2799.4	---	13214
14	Jalisco	22986.2	56579.8	1869	2657	---	224159.5
15	México	53373.5	79934.16	5638	14000	---	868152.28
16	Michoacán	3856.2	8814.8	4450	---	19026	20590
17	Morelos	3217.4	5201.6	31400	52200	---	9936
18	Nayarit	4931.9	11502.4	765	1910	---	---
19	Nuevo León	23990.8	43384.3	25000	75000	---	219077
20	Oaxaca	999	2,497	1005	1365	---	17808
21	Puebla	8730.3	18642.7	44000	52800	65110	164260
22	Querétaro	919.91	1623.5	---	1100	---	74420
23	Quintana Roo	3278.33	6843.5	1400	---	---	---
24	San Luis Potosí	1,540	3,849	---	5726	---	9354
25	Sinaloa	8925.6	15036.8	---	4261.5	10858.4	16287.6
26	Sonora	10935.25	18239.6	8684	21710	---	45000

27	Tabasco	2603.3	4341.08		15674	---	---
28	Tamaulipas	12013.6	20148.05	4248	10620	---	---
29	Tlaxcala	1408.91	2348.16	10736	26840		29516
30	Veracruz	11656.4	19465.08	2693	3602	---	539860
31	Yucatán	5445.25	15075.41	---	---	---	136654.48
32	Zacatecas	3294.3	5768.27	1721	2065		8805.1
<b>Total=</b>		<b>254132.63</b>	<b>483415.73</b>	<b>168167.4</b>	<b>348082.7</b>	<b>242847.4</b>	<b>2802735.85</b>

Fuente: Elaboración propia en base al COMPRANET

Nota. Falta el sector privado

Nota. Faltan otros generadores (no de servicio a la salud humana)

Nota. Faltan otros generadores (dependencias)

Nota. Posible acceso incompleto a la información

\*Datos más antiguos de 2014 y 2016 de la secretaría de salud y SESA

#### Total de kg mensuales

	Min kg	Max kg
IMSS	254132.63	483415.73
ISSSTE	168167.4	348082.7
Secretaria de salud y SESA	242847.4	2802735.85
<b>Total=</b>	<b>665,147.43</b>	<b>3,634,234.28</b>

#### Cantidad máxima de toneladas generadas mensualmente

**3634.23 ton**

A continuación, se presenta el desarrollo del ACV de acuerdo a la norma ISO 14044:2006.

### 6.3 FASE 1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

#### 6.3.1 Objetivo

El objetivo de esta investigación es analizar todo el proceso que requiere la gestión de los RPBI desde que sale de una unidad de servicio a la salud, hasta llegar al proceso de incineración. La finalidad es identificar los impactos ambientales significativos del proceso de gestión de RPBI. Los resultados obtenidos serán presentados como proyecto de tesis en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental y expuestos a la comunidad científica y actores interesados.

#### 6.3.2 Alcance

##### 6.3.2.1 Unidad funcional y flujo de referencia

Se ha definido como unidad funcional tratar e incinerar de forma segura los RPBI generados, recolectados y entregados en la planta incineradora. El flujo de referencia comprende 288 toneladas de RPBI generados por distintas unidades hospitalarias pertenecientes al sector público durante un periodo comprendido de 12 meses.

##### 6.3.2.2 Descripción y límites del sistema

El área de estudio será una planta incineradora de RPBI ubicada en el municipio de Oaxaca de Juárez. De las fases tradicionales del ACV, extracción de materias primas, transporte, manufactura, uso y fin de vida. Este trabajo se enfoca principalmente en la etapa de manufactura y uso definiéndose un ACV de la cuna a la tumba, en el cual se analizará el escenario de gestión de RPBI (Figura 6.3).

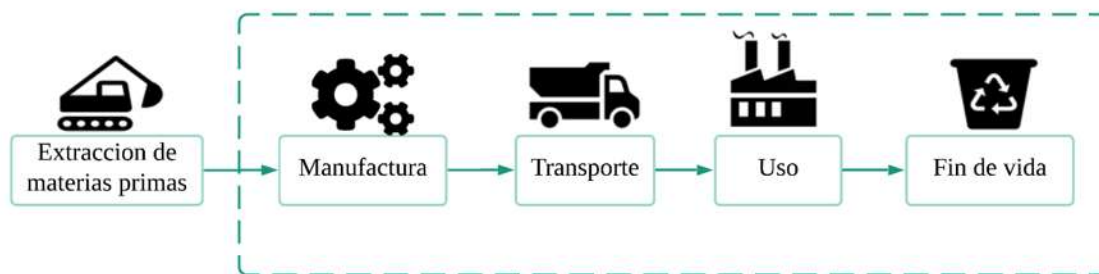


Figura 6.3. Límites del sistema

### 6.3.2.3 Criterios de cohorte y asignación para cada escenario

Para este estudio de la evaluación del impacto ambiental de la incineración de RPBI se ha considerado que el incinerador se encuentra ubicado en el municipio de Oaxaca de Juárez (16.9131400, -06.7878050). Se modelará el impacto ambiental de los siguientes procesos unitarios (Figura 6.4) descritos a continuación:

- Manufactura del horno, en este proceso se van a omitir la obtención de materias primas y transporte ya que para fines de este estudio no nos interesa conocer la procedencia de los materiales, solamente se cuenta con el material necesario para crear el horno. Que consta de una estructura metálica, tabique refractario pesado, tabique ligero aislante, sacos de K-set, sacos de concreto denso, botes de sairset, bultos de grava, caja de lana mineral, tiros de chimenea y torre de estación de lavado.
- Transporte del horno, en esta etapa se toma en cuenta que, una vez finalizada la construcción del horno en Tula, Hidalgo fue transportado hacia el lugar de la planta incineradora en el municipio de Oaxaca de Juárez donde se incineraran los RPBI. La ruta de transporte considera la distancia recorrida que comprende 512 km y el peso total del incinerador es de aproximadamente 10 toneladas. El vehículo empleado para el transporte utiliza como combustible diésel y tiene una capacidad total de carga de 15 toneladas.
- Obtención y transporte de los RPBI, considerando que se realiza cinco veces por semana, transportando cada día un total 1200 kg de residuos, se obtiene un total de 24 toneladas por mes y 288 toneladas por año. El vehículo empleado utiliza como combustible gasolina y tiene una capacidad total de carga de 1200 kg. De acuerdo a la NOM-087-SEMARNAT-1995, el vehículo recolector es de caja cerrada, hermético y cuenta con sistemas de captación de escurrimiento y cuenta con sistema de enfriamiento. La ruta de transporte considera solo la distancia comprendida directamente de las unidades hospitalarias o sitio de generación (Hospital Regional Presidente Juárez, Hospital de Alta Especialidad de Oaxaca, Hospital de la Niñez Oaxaqueña), hasta la Planta Incineradora de RPBI.

- Uso (incineración de RPBI), una vez transportado el incinerador hasta el lugar de la planta para su funcionamiento y su uso se necesitará una cámara de refrigeración la cual utiliza energía eléctrica, un pozo de agua y un sistema de gas LP, para su correcto funcionamiento. La capacidad de incineración del horno es de 250-300 kg/ciclo y tiene la capacidad de mantener una temperatura constante de 1000 °C a 1100 °C.
- Fin de vida, una vez llevado a cabo el proceso de incineración se obtendrán cenizas como residuos finales, los cuales son llevados al relleno sanitario. Por otra parte, se obtendrán emisiones de gases, estos son dirigidos al lavador de gases que tiene una capacidad de 350 kg/h.

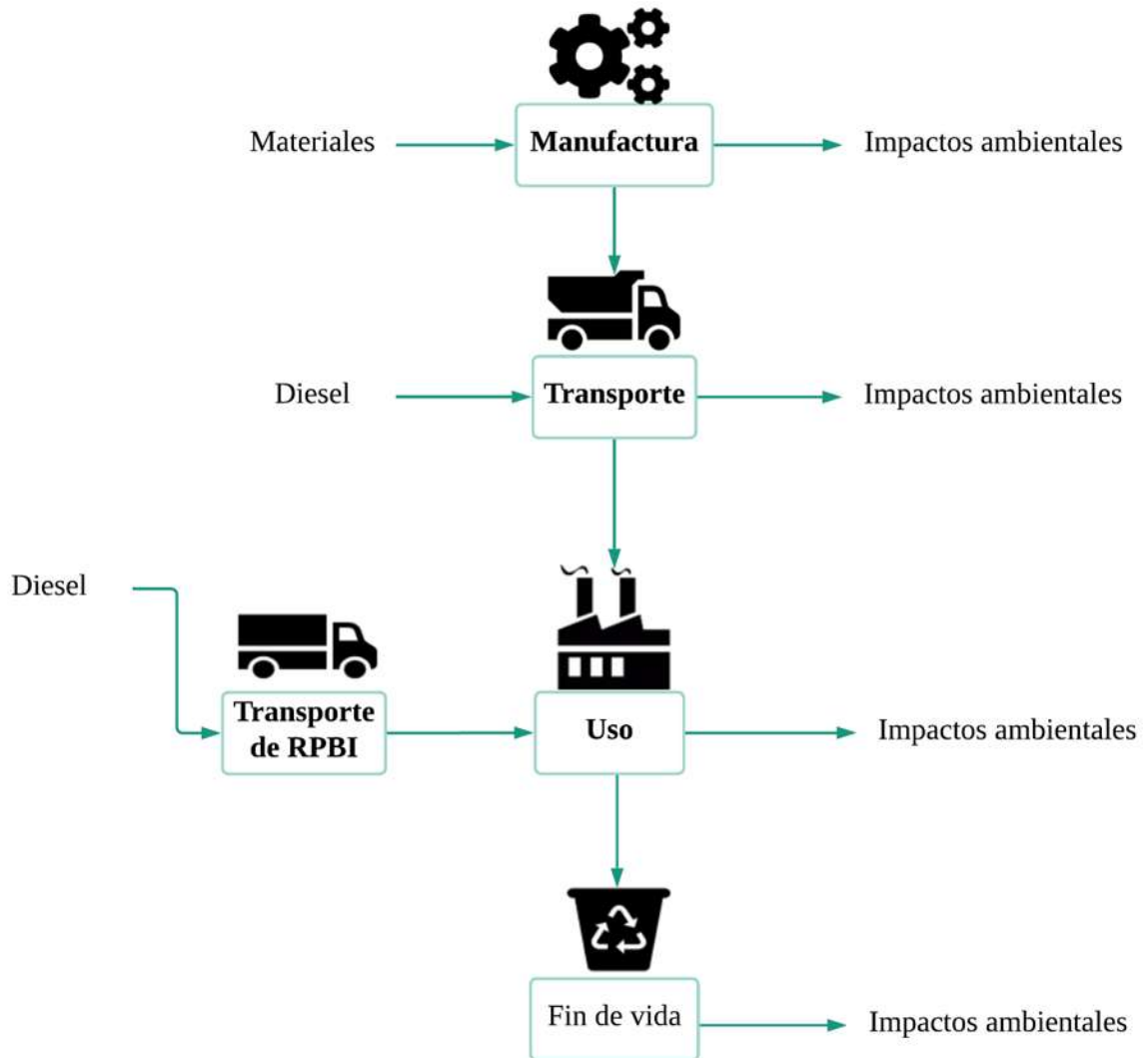


Figura 6.4. Escenario de incineración de RPBI

### 6.3.3 Metodología de la EICV y tipos de impacto

Se modelará el impacto ambiental del escenario de incineración de RPBI con el método ReCiPe Midpoint 2008. El análisis incluye la evaluación de todas las categorías de punto medio y se presentarán los resultados de la clasificación y caracterización. La modelación se realizará en software de análisis de ciclo de vida SimaPro versión 8.2.3. En la que se incluye la construcción del escenario de gestión de RPBI.

### 6.3.4 Tipos y fuentes de datos del inventario

Los datos fueron obtenidos directamente en el sitio de estudio, bases de datos, sitios web de empresas y fichas técnicas. La Tabla 6.2 presenta las fuentes de datos para el inventario de ciclo de vida del escenario de incineración de residuos.

Tabla 6.2. Fuentes de obtención para construir el ICV

<b>Proceso unitario</b>	<b>Tipo de datos</b>	<b>Dato</b>	<b>Fuente</b>
Manufactura del horno	Materiales de elaboración	Investigado	Ficha técnica de proveedor
Transporte de horno	Vehículo de transporte Capacidad de carga	Investigado	Ficha técnica de proveedor
tkm	Cantidad y distancia recorrida	Calculado	<a href="https://www.google.com.mx/maps">https://www.google.com.mx/maps</a>
Instalación de la planta (Uso)	Cantidad de materiales	Investigado	Ficha técnica de proveedor
Transporte de RPBI	Vehículo de transporte Capacidad de carga	Investigado	<a href="https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/cake/Pages/ecoetiquetado/19161">https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/cake/Pages/ecoetiquetado/19161</a> <a href="https://toyotalapaz.sfo2.cdn.digitaloceanspaces.com/2020/02/Ficha_tecnica_HILUX_Gasolina_20_web.pdf">https://toyotalapaz.sfo2.cdn.digitaloceanspaces.com/2020/02/Ficha_tecnica_HILUX_Gasolina_20_web.pdf</a>
tkm	Cantidad y distancia recorrida	Calculado	<a href="https://www.google.com.mx/maps">https://www.google.com.mx/maps</a>

## **6.4 FASE 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA**

El inventario de ciclo de vida (ICV) es la etapa del ACV donde se conjunta toda la información relevante para el análisis de impacto ambiental.

A continuación, se describe el procedimiento con el cual se creó el ICV para el escenario de incineración de RPBI analizado y se explica brevemente cada una de las etapas del sistema en estudio.

### **6.4.1 Descripción de las etapas del ACV del proceso de incineración**

#### **6.4.1.1 Elaboración del horno incinerador**

De acuerdo en lo descrito en los límites del sistema la primera etapa a considerar fue la elaboración del horno incinerador se llevó a cabo en Tula, Hidalgo. El incinerador es un modelo triangular de alta eficiencia (Figura 6.5), cuenta con una cámara de incineración, una post-cámara, dos tiros de chimenea, tres quemadores atmosféricos a gas LP, un quemador atmosférico a gas LP para post-cámara, tres toberas para oxigenación y un lavador de humos.



Figura 6.5. Horno incinerador

El horno está construido en una base metálica de perfiles de acero, vigas y canales estructurales y lámina galvanizada. Dentro de esta estructura metálica el horno está construido a base de tabiques refractarios pesados y ligeros aislantes (Figura 6.6).



Figura 6.6. Tabiques refractarios

Como parte de los materiales de construcción se utilizaron diferentes materiales con propiedades refractarias como los concretos densos, concretos aislantes, sacos de k-set, botes de sairset, grava, agua y lana mineral de roca (Figura 6.7).



Figura 6.7. Materiales

La torre de estación de lavado (Figura 6.8) está construida a base de lámina galvanizada y acero inoxidable. Como parte del horno incinerador, este cuenta con un tablero de control conformado por un gabinete, 2 pirómetros, 2 termopares, 2 temporizadores, 2 válvulas solenoides y un pedestal metálico (Figura 6.9).



Figura 6.8. Torre de estación de lavado



Figura 6.9. Tablero de control

#### 6.4.1.2 Transporte

Como parte del transporte, el horno incinerador fue transportado del lugar de elaboración hasta el lugar de instalación en la planta incineradora en el municipio de Oaxaca de Juárez. Se transportó el horno junto con la torre de estación de lavado y un tanque para almacenar gas LP (Figura 6.10). Los RPBI fueron recolectados de tres unidades hospitalarias distintas pertenecientes al estado de Oaxaca.



Figura 6.10. Transporte del horno

### 6.4.1.3 Instalaciones de la planta incineradora

Como parte de las instalaciones de la planta incineradora se construyó una cámara de refrigeración Figura 6.11, la cual tiene una capacidad de 3600 kg, con una temperatura de 4 y 6°C. El equipo de refrigeración está conformado por un condensador (Figura 6.12) y un evaporador (Figura 6.13). Como parte de las instalaciones en la planta, se cuenta con un pozo de agua (cisterna) para el uso de los equipos, así como el de los servicios generales.



Figura 6.11. Cámara de refrigeración



Figura 6.12. Condensador



Figura 6.13. Evaporador

#### 6.4.1.4 Fin de vida

Como parte de la etapa de fin de vida, en la planta incineradora se obtienen cenizas provenientes del proceso de incineración, estas son enviadas al relleno sanitario para su disposición final. Cabe señalar que se obtienen 20 kg de cenizas por tonelada incinerada. Por otro lado, se obtienen lodos que son enviados a un biodigestor (Figura 6.14) para su tratamiento, seguido de esto los lodos son descargados al alcantarillado municipal.



Figura 6.14. Biodigestor

#### 6.4.2 Límites del sistema

El sistema de estudios tuvo un enfoque “de puerta a puerta”, es decir que se tomaron en cuenta las etapas de manufactura del horno hasta la etapa en que salen las cenizas y las descargas de agua. Para la etapa de transporte se consideró el transporte del sitio de manufactura del horno y el transporte de los residuos desde las unidades generadoras al lugar de la planta. Se tomó en

cuenta los materiales y combustibles utilizados para la utilización del incinerador. Los límites del sistema se representan en la Figura 6.15.

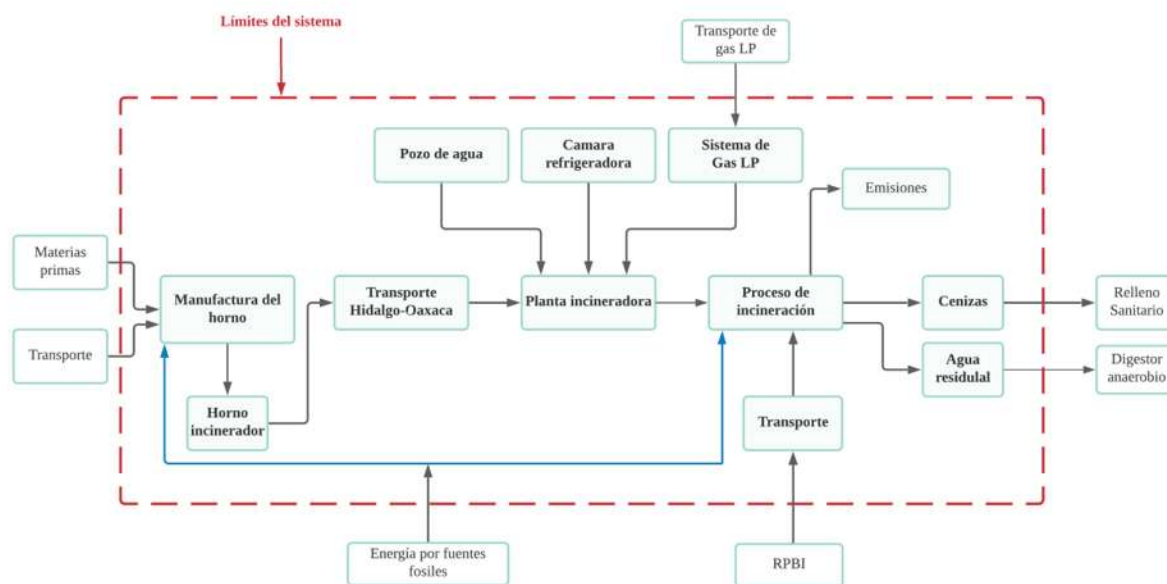


Figura 6.15. Esquema general del sistema para el ACV de incineración de RPBI

### 6.4.3 Manufactura del horno incinerador

La elaboración del horno incinerador se llevó a cabo en Tula Hidalgo. En la Tabla 6.3, se muestra el inventario de ciclo de vida de la manufactura del horno, tomando en cuenta que los materiales ya se encontraban en el lugar para la construcción del horno incinerador. Posteriormente, los datos fueron cargados al software SimaPro 8.2.3.

Tabla 6.3. Inventario de ciclo de vida manufactura del horno

Descripción	Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Cantidad	Unidad
Tabique ligero aislante	Potassium oxide	0.12	kg
Descripción	Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)	Cantidad	Unidad
Metal PTR, Laminas galvanizadas, vigas y canales estructurales	Steel hot dip galvanized (ILCD), blast furnace route, production mix, at plant, 1kg, typical thickness between 0.3 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm. GLO S	148.6	kg
Agua	Tap water {RoW}  market for   Alloc Def, U	38	kg

Grava	Gravel, round {GLO}  market for   Alloc Def, U	47.5	kg
Lana mineral	Basalt {GLO}  market for   Alloc Def, U	2	kg
Acero inoxidable (Torre de estación de lavado)	Steel, stainless 304, flat rolled coil/kg/RNA	29.4	kg
Tabique refractario pesado, aislante, sacos de k-set, concreto denso y aislante, botes de sairset	Silica sand {GLO}  market for   Alloc Def, U	75.95	kg
Tabique refractario pesado, aislante, sacos de k-set, concreto denso y aislante, botes de sairset	Aluminium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U	144.71	kg
Tabique ligero aislante y tabique pesado	Magnetite {GLO}  market for   Alloc Def, U	1.03	kg
Tabique ligero aislante y tabique pesado	Titanium dioxide {RoW}  market for   Alloc Def, U	1.59	kg
Tabique ligero aislante y tabique pesado	Lime, packed {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.17	kg
Tabique ligero aislante	Magnesium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.05	kg
Tabique ligero aislante	Sodium {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.01	kg
Sacos de k-set	Cement, Portland {RoW}  market for   Alloc Def, U		kg
Sacos de k-set	Kaolin {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.07	kg

#### 6.4.4 Transporte del horno incinerador

El transporte del horno considero una distancia recorrida del sitio de elaboración hasta el lugar de la instalación en la planta incineradora. La ruta de transporte se estableció a partir de la aplicación web “Google Earth” (Figura 6.16). El peso total del horno transportado es de aproximadamente 10 toneladas. La tecnología de transporte consideró el modelo “Transport,

freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {GLO}|market for| Alloc Def, U” de la base de datos de Ecoinvent versión 3.0.0.

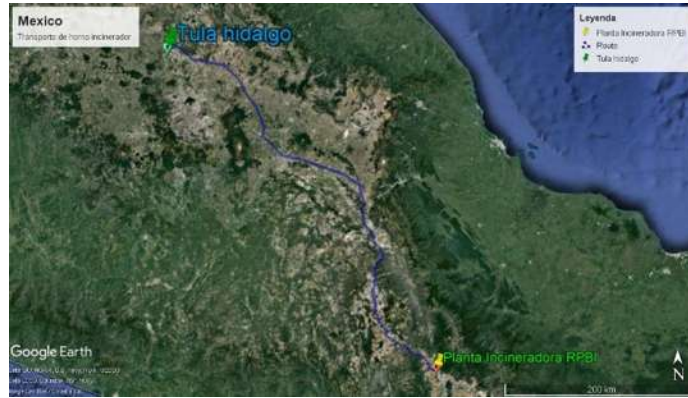


Figura 6.16. Ruta de transporte del horno. Elaboración a partir de “Google Earth”

Para calcular el indicador de toneladas kilómetro (tkm), se tomó la distancia obtenida de Google Earth y el peso total del horno incinerador (Ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo de las toneladas-kilómetro

$$tkm = m * d$$

**Donde:**

**tkm:** toneladas-kilometro

**m:** masa

**d:** distancia recorrida (m, km, mi)

La distancia recorrida desde Tula, Hidalgo hasta el lugar de instalación del incinerador en el municipio de Oaxaca de Juárez, es de 512 km. Posteriormente, se generó la base de datos del ICV para esta etapa y se cargó en el software SimaPro 8.2.3. (Tabla 6.4).

Tabla 6.4. Inventario de ciclo de vida transporte de horno incinerador

<b>Etapa</b>	<b>Características del transporte. Ecoinvent Allocation Default Unit versión 3.0 SimaPro 8.2.3</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>

Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3	5120	tkm
Horno incinerador	{GLO} market for  Alloc Def, U		

#### 6.4.5 Transporte de RPBI

El transporte de RPB consideró una distancia recorrida de los sitios de generación (Hospital Regional Presidente Juárez, Hospital de Alta Especialidad de Oaxaca, Hospital de la Niñez Oaxaqueña) hasta el lugar de la instalación en la planta incineradora. La ruta de transporte se estableció a partir de la aplicación web “Google Earth” (Figura 6.17). La cantidad de RPBI transportados por día estimada es de 1 tonelada. La tecnología de transporte consideró el modelo “Transport, freight, lorry with refrigeration machine, cooling {GLO}| market for | Alloc Def, U” de la base de datos de Ecoinvent versión 3.0.0.



Figura 6.17. Ruta de transporte RPBI. Elaboración a partir de “Google Earth”

Para calcular el indicador de toneladas kilómetro (tkm), se tomó la distancia obtenida de Google Earth y el peso total del horno incinerador (Ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo de las toneladas-kilómetro

$$tkm= m*d$$

**Donde:**

**tkm:** toneladas-kilometro

**m:** masa

**d:** distancia recorrida (m, km, mi)

La distancia recorrida desde Tula, Hidalgo hasta el lugar de instalación del incinerador en el municipio de Oaxaca de Juárez, es de 512 km. Posteriormente, se generó la base de datos del ICV para esta etapa y se cargó en el software SimaPro 8.0.5.0 (Tabla 6.5).

Tabla 6.5. Inventario de ciclo de vida transporte RPBI

<b>Etapa</b>	<b>Características del transporte. Ecoinvent Allocation Default Unit versión 3.0 SimaPro 8.2.3</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Transporte RPBI	Transport, freight, lorry with refrigeration machine, cooling {GLO}  market for   Alloc Def, U	32.2	tkm

#### 6.4.6 Uso (incineración de RPBI)

Para la etapa de uso, el consumo de energía, combustible y agua se identificó mediante el uso de fichas técnicas de proveedor y se realizó la distribución del consumo en función a las 288 toneladas de RPBI incineradas por año. La composición promedio de los RPBI se muestra en la Tabla 6.6, esta se determinó a partir del reporte de manejo de residuos durante la emergencia sanitaria por COVID-19 (INECC, 2020) y ficha técnica de proveedor. En la Tabla 6.7 se muestra el inventario de ciclo de vida de esta etapa. Posteriormente, se cargó en el software SimaPro 8.2.3.

Tabla 6.6. Composición promedio de los RPBI

<b>Tipo de residuo</b>	<b>%</b>
Papel	38%
Residuos de tejidos vivos	19%
Plásticos (mezclados)	27%
Textiles	11%
Vidrio	5%

Fuente: elaboración propia en base a ficha técnica de proveedor, INECC 2020.

Tabla 6.7. Inventario de ciclo de vida uso (incineración de RPBI)

<b>Descripción</b>	<b>Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Electricidad cámara refrigeradora	Electricity, high voltage {MX}  market for   Alloc Def, U	3840	kWh
Agua	Tap water {RoW}  market for   Alloc Def, U	960000	kg
Gas LP	Liquefied petroleum gas {RoW}  market for   Alloc Def, U	218873.67	kg
<b>Descripción</b>	<b>Flujos finales de residuos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Cenizas	Waste in inert landfill	5.76	Ton
Lodos	Sludge	15.98	Ton
<b>Descripción</b>	<b>Salidas conocidas desde la tecnosfera. Residuos y emisiones para tratamiento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Papel	Waste incineration of paper fraction in municipal solid waste (MSW), EU-27	109.44	Ton
Tejidos vivos	Meat and bone meal {GLO}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U	54.72	Ton
Plástico	Waste incineration of plastics (PE, PP, PS, PB), EU-27	77.76	Ton
Textiles mezclados	Waste incineration of textile fraction in municipal solid waste (MSW), EU-27	31.68	Ton
Vidrio	Waste incineration of glass/inert material, EU-27	14.4	Ton

#### 6.4.7 Fin de vida

Para la etapa de fin de vida se tomaron en cuenta la cantidad de cenizas que se generan por una tonelada, a partir de ahí se obtuvo la generación de cenizas por año. En la Tabla 6.8 se muestra el inventario de ciclo de vida de esta etapa. Posteriormente, se cargó en el software SimaPro 8.2.3.

Tabla 6.8. Inventario de ciclo de vida de fin de vida

<b>Descripción</b>	<b>Salidas conocidas desde la tecnosfera. Residuos y emisiones para tratamiento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Cenizas	Ash from paper production sludge {RoW}  treatment of, residual material landfill   Alloc Def, U	5.76	ton

## 6.5 FASE 3: EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

La etapa de Evaluación de Impacto de ciclo de Vida (EICV) tiene como objetivo evaluar y analizar los impactos ambientales con relación a los materiales requeridos durante todo el proceso. El objetivo del ACV fue analizar los impactos ambientales de la gestión de RPBI. A continuación, se describirán los principales resultados obtenidos de la EICV.

### 6.5.1 Clasificación del impacto ambiental de la gestión de RPBI

De acuerdo a la norma ISO 14044:2006 se debe de realizar la asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto ambiental seleccionadas.

Se presentan las clasificaciones de los impactos ambientales de este sistema. Esta se llevó a cabo a partir del análisis de normalización del inventario de ciclo de vida a partir del método “ReCiPe Midpoint (H) V1. 12 World ReCiPe”.

### 6.5.2 Caracterización del impacto ambiental global

La caracterización del impacto ambiental es el segundo elemento obligatorio de la EICV que implica la conversión de los resultados del ICV a unidades comunes y la suma de los resultados convertidos dentro de la misma categoría de impacto. Esta conversión utiliza los factores de caracterización. En la Figura 6.18 se muestra el impacto ambiental por etapa con enfoque de ciclo de vida de la gestión de RPBI. De acuerdo con este resultado global, en la etapa de uso (incineración de RPBI) se concentró el 98.44% de los impactos totales del sistema.

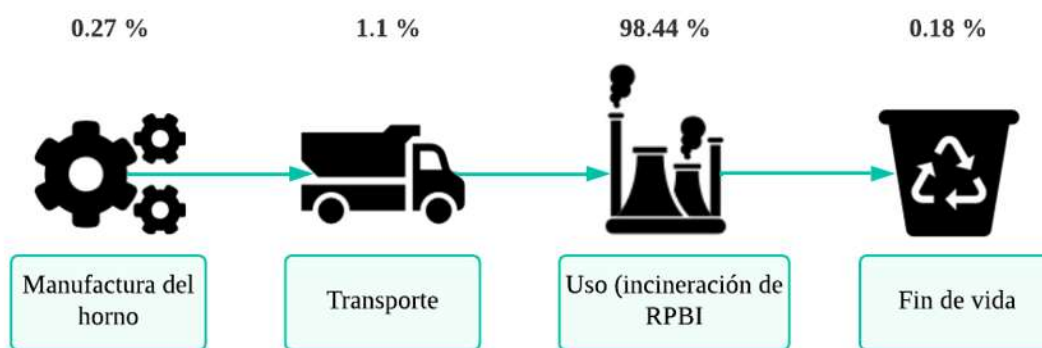


Figura 6.18. Impactos ambientales potenciales por etapa de ciclo de vida

### 6.5.3 Impacto ambiental de la gestión de RPBI por categoría

#### 6.5.3.1 Cambio climático

La Figura 6.19, muestra el impacto potencial a la categoría de cambio climático. Según los resultados, se emiten un total de 412.53 ton CO<sub>2</sub> eq al año por flujo de referencia equivalente a 288 ton/año. La etapa de uso concentró las mayores emisiones totales de GEI. El análisis de contribución reveló que la sustancia con mayor potencial de cambio climático fue el dióxido de carbono en aire.

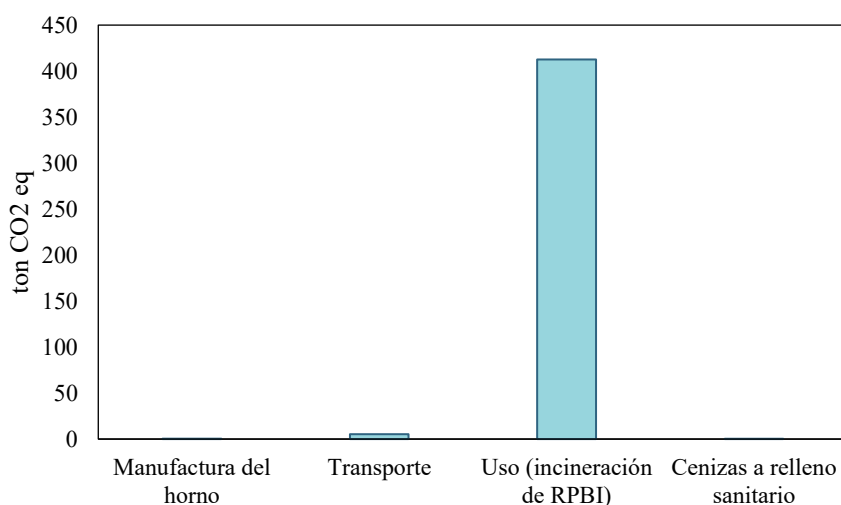


Figura 6.19 Cambio climático

#### 6.5.3.2 Agotamiento de la capa de ozono

En la categoría de agotamiento de la capa de ozono se estimó un potencial de impacto de 0.0140 kg CFC-11 eq por año. En la Figura 6.20, se observa que tales emisiones se relacionan principalmente a la etapa de uso. De acuerdo al análisis de contribución, la sustancia con mayor impacto al agotamiento de la capa de ozono fue el triclorotrifluoroetano.

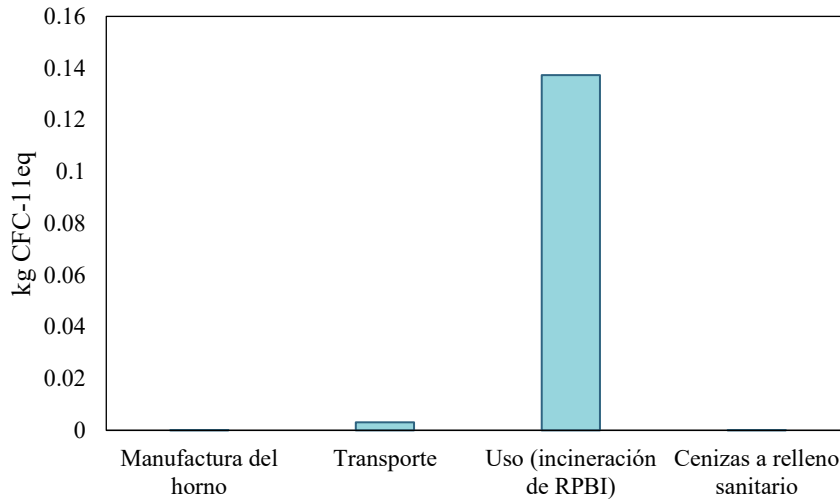


Figura 6.20 Agotamiento de la capa de ozono

### 6.5.3.3 Acidificación terrestre

En la Figura 6.21 se observa que la etapa de uso es la principal contribuyente a la categoría de acidificación terrestre con una contribución total de 1.35 ton de SO<sub>2</sub> eq, por las 288 ton que se incineran en un año. La etapa de uso contribuye con el 96% de la contribución total. De acuerdo al análisis de contribución, la sustancia con mayor impacto a la acidificación terrestre es el dióxido de azufre.

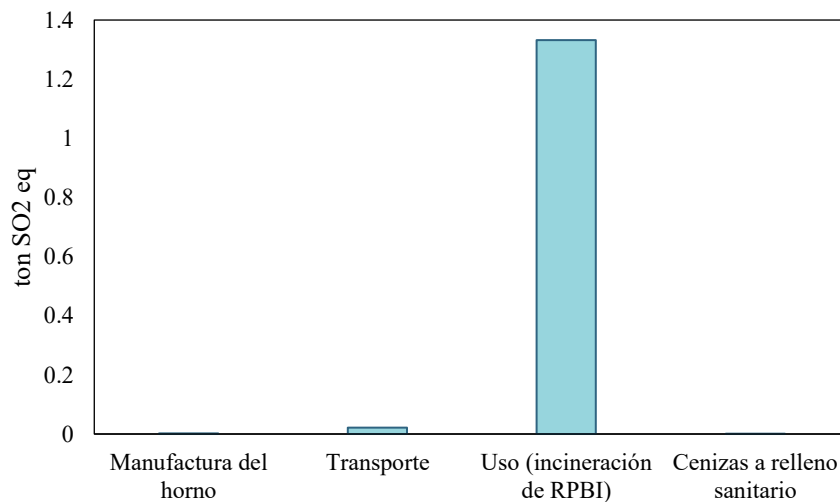


Figura 6.21. Acidificación terrestre

### 6.5.3.4 Eutrofización de agua fresca

Para la categoría de eutrofización de agua fresca se obtuvo un impacto potencial de 282.15 kg P eq por año. La etapa de cenizas a relleno sanitario contribuye con el 69%, seguido de la etapa de uso con un 29% de la contribución total (Figura 6.22). El análisis de contribución reveló que la sustancia con mayor potencial nitrificante fue el fosfato en agua.

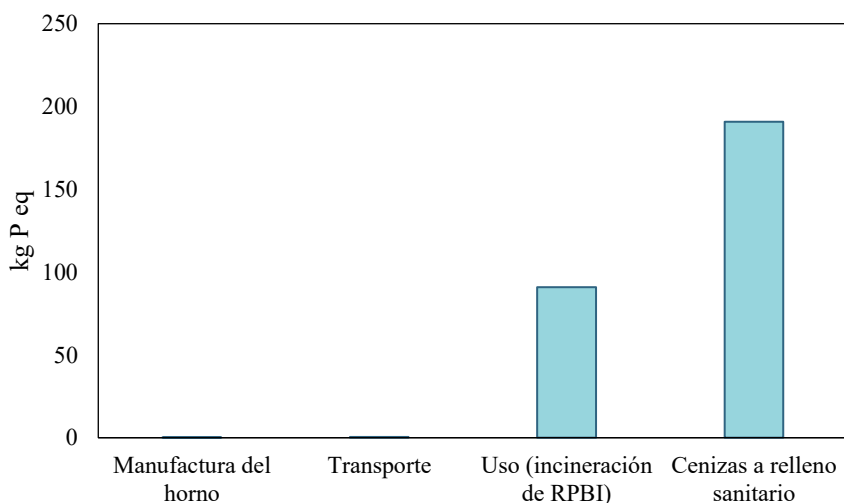


Figura 6.22. Eutrofización de agua fresca

### 6.5.3.5 Eutrofización marina

La Figura 6.23, muestra el impacto potencial a la categoría de eutrofización marina, de acuerdo a los resultados la contribución total es de 135.56 kg N eq por año. La etapa de uso contribuye con el 68%, seguido de la etapa de cenizas a relleno sanitario con un 30% de la contribución total.

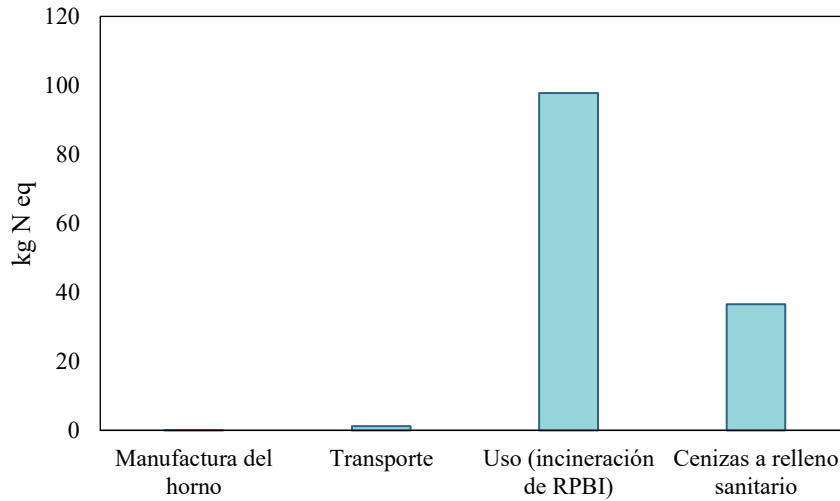


Figura 6.23. Eutrofización de agua marina

### 6.5.3.6 Toxicidad humana

La Figura 6.24, muestra el potencial de toxicidad humana, en la cual se emite un total de 27.36 ton 1,4-DB eq. Siendo la etapa de uso la de mayor contribución con el 83% de la contribución hacia la toxicidad humana. La sustancia con mayor presencia para la toxicidad humana fue el arsénico.

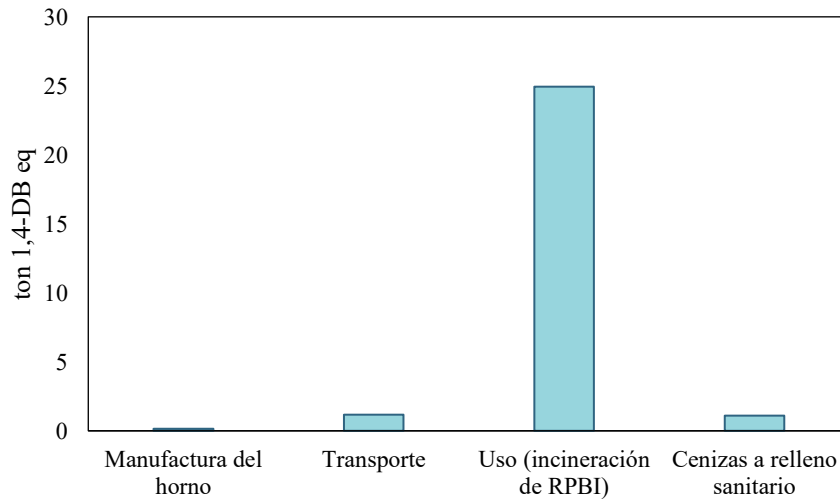


Figura 6.24. Toxicidad humana

### 6.5.3.7 Formación de oxidantes fotoquímicos

El potencial de formación de oxidantes fotoquímicos fue de 1080.67 kg NMVOC por las 288 ton incineradas. En la Figura 6.25, se observa que la etapa de uso es la de mayor contribución con un 94% del total de las emisiones, principalmente por el proceso de incineración de tejidos vivos, siendo los óxidos de nitrógeno la sustancia con mayor probabilidad de emisiones.

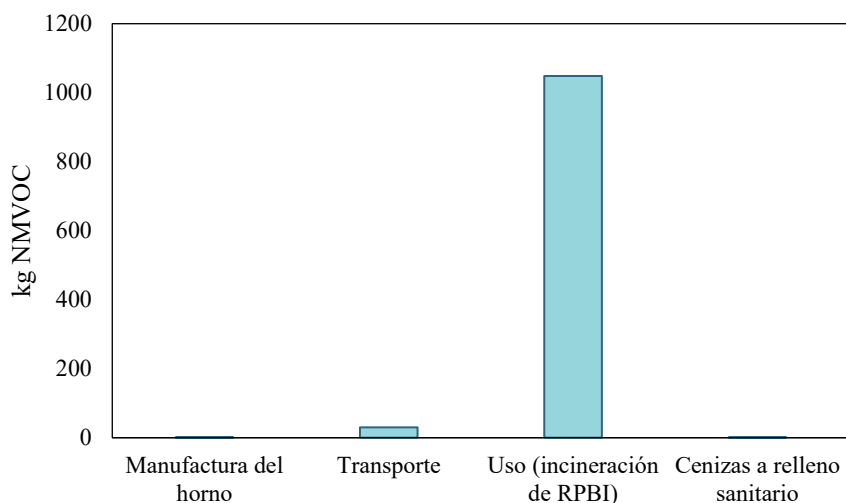


Figura 6.25. Formación de oxidantes fotoquímicos

### 6.5.3.8 Formación de material particulado

En la Figura 6.26, se muestra el impacto a la categoría de formación de material particulado, el cual está relacionado principalmente por la etapa de uso, con una contribución del 94% (424.96 kg PM<sub>10</sub> eq/año). De acuerdo al análisis se emite un total de 436.47 kg PM<sub>10</sub> eq, la sustancia con mayor emisión fue los óxidos de nitrógeno derivados de la incineración de tejidos vivos.

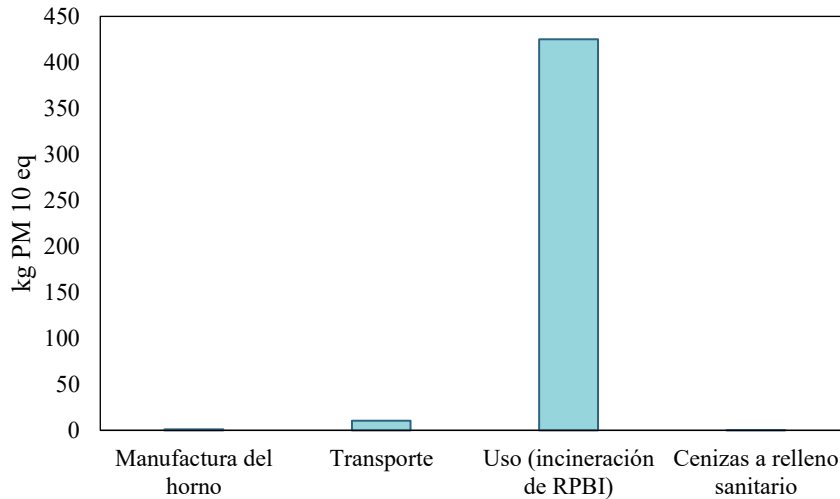


Figura 6.26. Formación de material particulado

### 6.5.3.9 Ecotoxicidad terrestre

La Figura 6.27 muestra el potencial de ecotoxicidad terrestre, donde se observa que la etapa de uso es la de mayor contribución con un 86% seguido de la etapa de transporte con un 13% de la contribución total. De acuerdo al análisis, se emiten al suelo un total de 16.57 kg 1,4-DB eq por año, siendo el bromo la principal sustancia que contribuye al impacto hacia la ecotoxicidad terrestre.

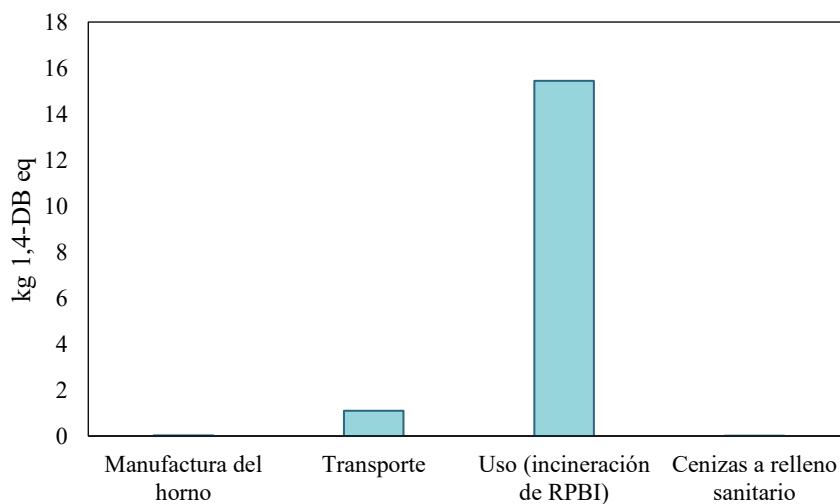


Figura 6.27. Ecotoxicidad terrestre

### 6.5.3.10 Ecotoxicidad de agua fresca

En la categoría de ecotoxicidad de agua fresca se estimó un potencial de impacto total de 1129.04 kg 1,4-DB eq/año, debido principalmente por la etapa de uso con una contribución del 82% de la contribución total (Figura 6.28). De acuerdo al análisis de contribución, la sustancia con mayor impacto a la ecotoxicidad terrestre es el cobre.

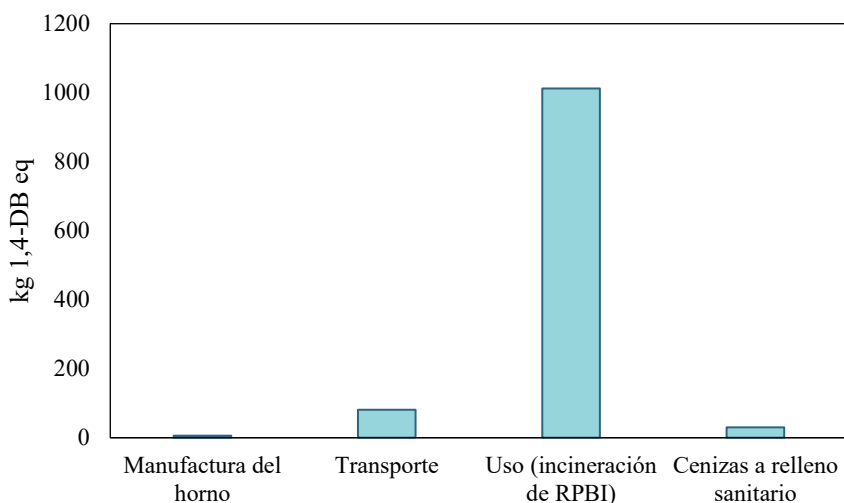


Figura 6.28. Ecotoxicidad de agua fresca

### 6.5.3.11 Ecotoxicidad marina

De acuerdo a la Figura 6.29, se observa que la etapa de uso contribuye con un 80% (843.58 kg 1,4-DB eq) a la categoría de ecotoxicidad marina, seguido de la etapa de transporte con un 13% (77.53 kg 1,4-DB eq). De acuerdo al análisis, se estima que en total se emiten al año 954.79 kg de 1,4-DB eq. Por otra parte, la sustancia mayormente relacionada con la ecotoxicidad marina fue el cobre.

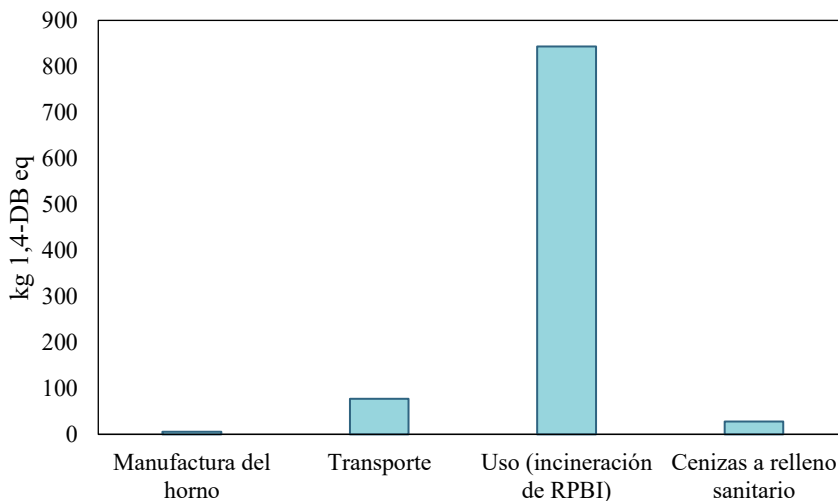


Figura 6.29. Ecotoxicidad marina

### 6.5.3.12 Radiación ionizante

Para la categoría de radiación ionizante según los resultados, se emite un total de 51044.10 kBq U235 por año. En la Figura 6.30 se muestra que la etapa de incineración concentró el 97% de las emisiones totales en esta categoría. De acuerdo al análisis de contribución la sustancia con mayor potencial de contribución fue el carbono-14 dirigido al aire.

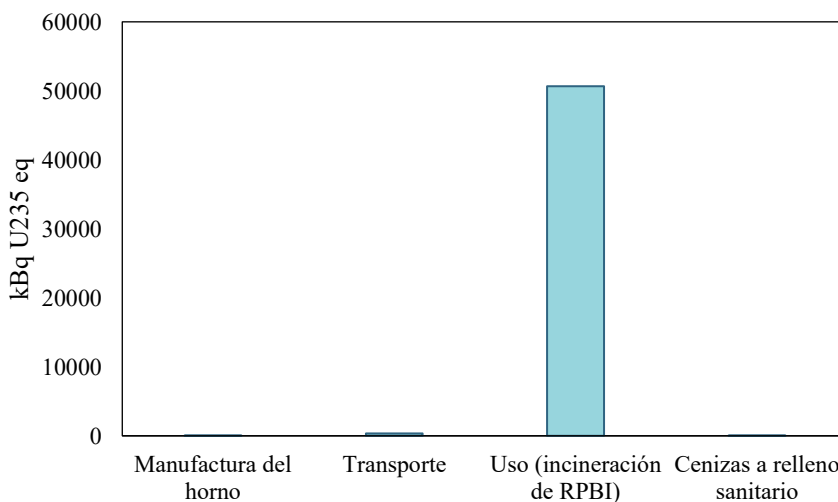


Figura 6.30. Radiación ionizante

### 6.5.3.13 Ocupación de tierras agrícolas

La Figura 6.31, muestra el potencial de impacto a la categoría de ocupación de tierras agrícola, se observa que la etapa de uso contribuye con el 91% del total de  $m^2a$  (1900.07  $m^2a$ ). De acuerdo a los resultados, la contribución total es de 1976.97  $m^2a$ , relacionados principalmente a la ocupación intensiva de bosque.

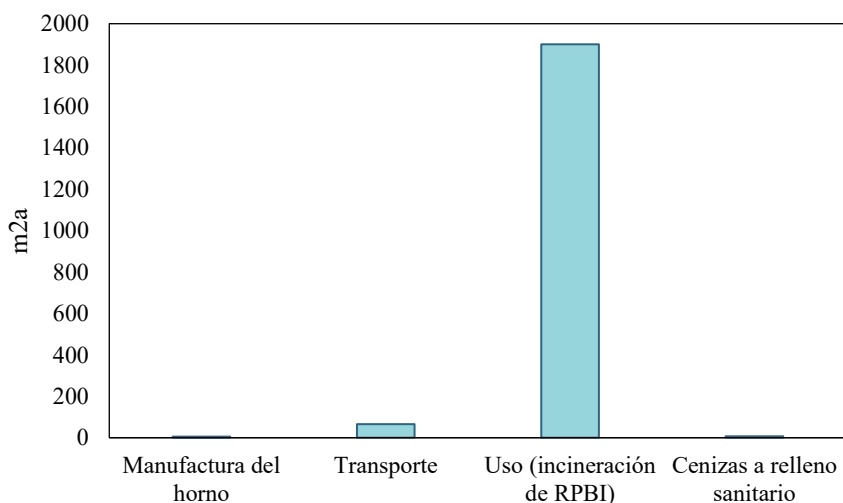


Figura 6.31. Ocupación de tierras agrícolas

### 6.5.3.14 Ocupación de suelo urbano

La Figura 6.32 muestra el impacto potencial a la categoría de ocupación de suelo urbano con un total de 1603.63  $m^2a$ . Se observa que la etapa de uso contribuye con un 73% (1400.44  $m^2a$ ), seguido de la etapa de transporte con un 22% (170.95  $m^2a$ ). De acuerdo al análisis de contribución, la principal causa de impacto a esta categoría es la ocupación de tierra por área industrial.

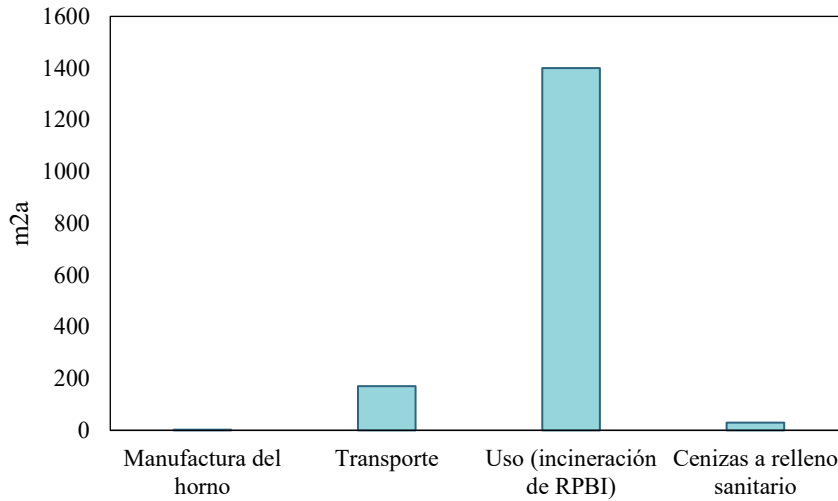


Figura 6.32 Ocupación de suelo urbano

### 6.5.3.15 Transformación de suelo natural

Para la categoría de transformación de suelo natural se obtuvo un potencial de impacto total de 278.35 m<sup>2</sup>. En la Figura 6.33 se muestra que la etapa de uso contribuye principalmente con un 95% de la contribución total. De acuerdo al análisis de contribución, la principal causa de impacto a esta categoría es por la transformación del bosque.

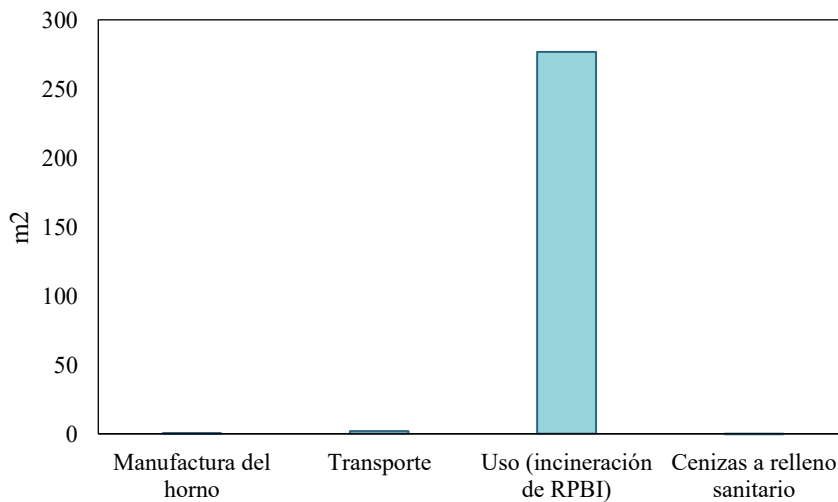


Figura 6.33. Transformación de tierra natural

### 6.5.3.16 Agotamiento de agua

En la Figura 6.34 se muestra que las etapas que contribuyeron al agotamiento de agua fueron la manufactura del horno con 23% (835.18 m<sup>3</sup>) y la etapa de uso con el 75% (3458.31 m<sup>3</sup>). De acuerdo a los resultados, se obtuvo un total de 4312.20 m<sup>3</sup> por flujo de referencia equivalente a 288 ton/año.

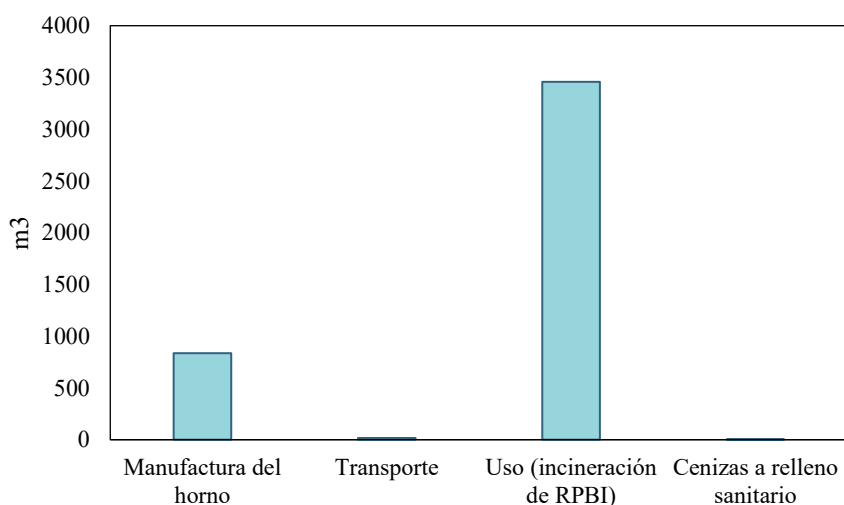


Figura 6.34. Agotamiento de agua

### 6.5.3.17 Agotamiento de metales

La Figura 6.35, se muestra el potencial de agotamiento de metales asociado principalmente por la etapa de manufactura del horno con 26%, seguido de la etapa de transporte y uso con una contribución del 14% y 58% respectivamente. De acuerdo a los resultados, se requiere un total de 3.66 ton Fe eq por año, la sustancia relacionada principalmente con el impacto a esta categoría es el cromo.

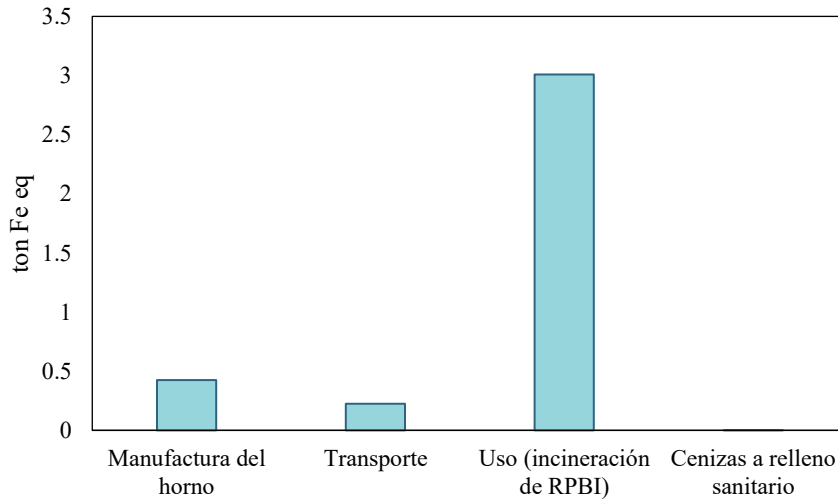


Figura 6.35. Agotamiento de metales

### 6.5.3.18 Agotamiento de recursos fósiles

Para la categoría de agotamiento de recursos fósiles se obtuvo una contribución de 257.87 ton oil eq por año. En la Figura 6.36, se observa que la etapa de uso contribuyó principalmente en esta categoría con 97% (255.93 ton oil eq). De acuerdo al análisis de contribución, se obtuvo que el impacto sobre el agotamiento de recursos fósiles, es principalmente sobre el uso de petróleo.

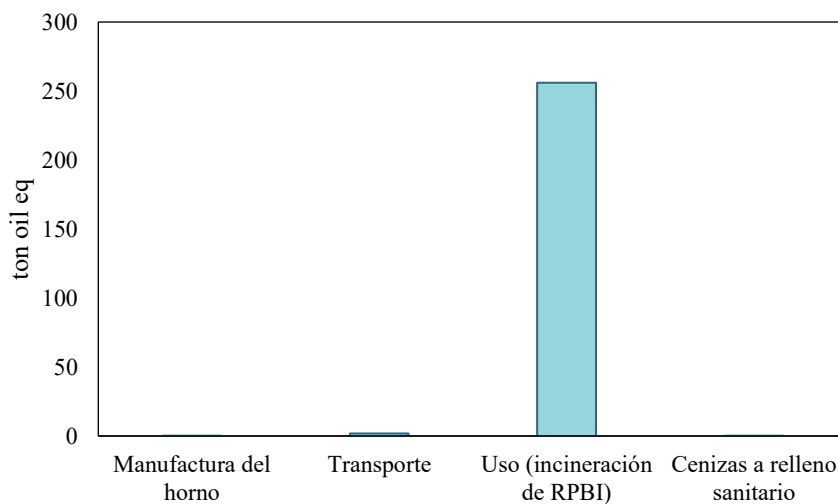


Figura 6.36. Agotamiento de recursos fósiles

## 6.6 FASE 4: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de resultados del ACV permite generar conclusiones y recomendaciones sólidas. Los resultados obtenidos de la distribución del impacto ambiental de los procesos unitarios se muestran en la Figura 6.37. De acuerdo al análisis, los resultados muestran que la etapa de uso (incineración de RPBI) es la más significativa con el 98% de la contribución total del impacto ambiental.

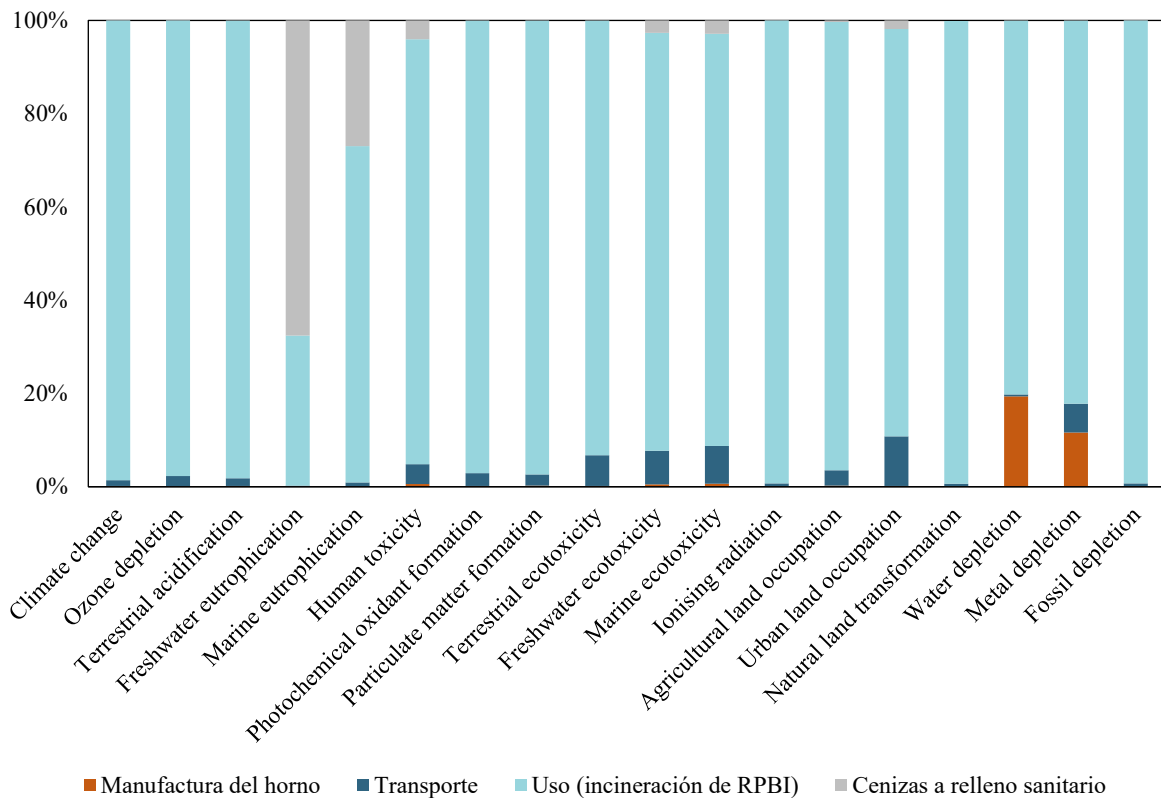


Figura 6.37. Potenciales impactos

### 6.6.1 Identificación de impactos significativos en la etapa de uso (incineración de RPBI)

La EICV mostró que la etapa de uso concentró el mayor impacto ambiental del ciclo de vida del sistema de gestión de RPBI. Se hizo una selección de categorías de impacto significativas de la etapa de uso con una contribución mayor al 85%. En la Tabla 6.9 se presentan las categorías significativas de la etapa de uso, siendo la categoría de cambio climático la más significativa con un 98% de contribución, seguido del agotamiento de la capa de ozono (97%), agotamiento

de recursos fósiles (97%), radiación ionizante (96%) y acidificación terrestre (96%). Cabe señalar que los datos obtenidos son en función del flujo de referencia equivalente a 288 ton por año.

Tabla 6.9. Categorías de impactos significativas en la etapa de uso

<b>Etapa del ACV</b>	<b>Categoría de impacto significativa (&gt;85% de contribución)</b>	<b>Contribución de impacto ambiental</b>	<b>Contribución %</b>
Uso (incineración RPBI)	Cambio climático	412.53 ton CO <sub>2</sub> eq/año	98%
	Agotamiento de la capa de ozono	0.137 kg CFC-11 eq/año	97%
	Acidificación terrestre	1.33 ton SO <sub>2</sub> eq/año	96%
	Toxicidad humana	24.94 ton 1,4-DB eq	91%
	Formación de oxidantes fotoquímicos	1048.56 kg NMVOC/año	95%
	Formación de material particulado	424.96 kg PM <sub>10</sub> eq/año	94%
	Ecotoxicidad terrestre	15.44 kg 1,4-DB eq	90%
	Ecotoxicidad de agua fresca	1012.01 kg 1,4 DB eq	89%
	Radiación ionizante	18751.98 kBq U235 eq/año	96%
	Ocupación de tierra agrícola	1900.07 m <sup>2</sup> a	91%
Transformación de tierra natural	276.800 m <sup>2</sup>	95%	
Agotamiento de recursos fósiles	255.93 ton oil eq/año	97%	

Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos del software SimaPro.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la etapa de uso, la categoría de cambio climático es la más significativa con una contribución de 412.53 ton CO<sub>2</sub> eq/año, principalmente por la incineración de plástico. En la Tabla 6.10, se muestra una comparación del resultado obtenido

en esta investigación con otros reportes de ACV para la incineración de residuos médicos y RSU en la categoría de cambio climático. Los resultados mostrados están en función de 1 tonelada de residuos, por lo que el resultado final es de 1.432 ton CO<sub>2</sub> eq por tonelada de residuos.

Comparando los diferentes resultados de las investigaciones, se observa que el impacto a cambio climático por la incineración de RPBI es mayor a diferencia de la incineración de RSU. Sin embargo, la variación de estos valores puede deberse a diferentes factores tales como:

- Flujo de referencia
- Enfoque de ACV
- Método de análisis
- Unidad funcional
- Tipo de combustible

Tabla 6.10. Comparación de resultados obtenidos en la categoría de cambio climático

	<b>Flujo de referencia</b>	<b>Enfoque de ACV</b>	<b>Categoría de impacto</b> <b>Cambio climático</b>
<b>Resultados propios</b>	1 tonelada	De la cuna a la tumba	1.432 ton CO <sub>2</sub> eq
<b>Incineración desechos médicos (Zhao, 2021)</b>	1 tonelada	De puerta a puerta	62.74 kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Residuos Sólidos hospitalarios (Ali, Wang, &amp; Chaudhry, 2016)</b>	1 tonelada	De la puerta a la tumba	1134 kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Incineración RSU (Beylot, 2018)</b>	1 tonelada	De puerta a puerta	40 kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Incineración RSU (Boesch, 2014)</b>	1 tonelada	De puerta a la tumba	494 kg CO <sub>2</sub> eq

Uno de los factores que influye de manera significativa a la variación de los resultados es el enfoque de ACV con el que se lleva a cabo cada investigación, ya que se toman en cuenta más procesos en algunas que en otras. Para la incineración de RSU se tiene que tomar en cuenta que

antes de llevarse a cabo la incineración se realizan procesos de separación de materiales, a diferencia de los RPBI que no son manipulables y son llevados directamente al incinerador.

En comparación con los resultados de la incineración de residuos médicos se observa ligeramente una contribución mayor (Ali, Wang, & Chaudhry, 2016), debido a que se combinó la incineración de desechos médicos con residuos hospitalarios. Por otro lado, en esta investigación se utilizó el gas LP como combustible, a diferencia de algunas de las investigaciones en la que se utilizó otro tipo de combustible como keroseno (Zhao, 2021) y gas natural (Ali, Wang, & Chaudhry, 2016).

# CAPÍTULO 7 MAPEO DE FLUJO DE VALOR

Para llevar a cabo la incineración de RPBI se requiere del consumo de materiales energéticos para su correcto funcionamiento. A pesar de que las actividades que se realizan dentro del proceso de incineración se encuentran establecidas por la normatividad, puede haber oportunidad de mejora para el sistema. Se aplicó la herramienta de mapeo de flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés), esta nos permitirá encontrar si hay etapas con posibles cambios de mejora.

## 7.1 Desarrollo del mapeo de flujo de valor

En la investigación actual se integró la herramienta de VSM, para desarrollar una propuesta de mejora del escenario futuro, esto con respecto a los recursos energéticos consumidos en cada etapa del proceso de incineración. En la Figura 7.1 se muestra el plano arquitectónico de la planta incineradora, con el fin de visualizar cómo se encuentra estructurado el lugar.

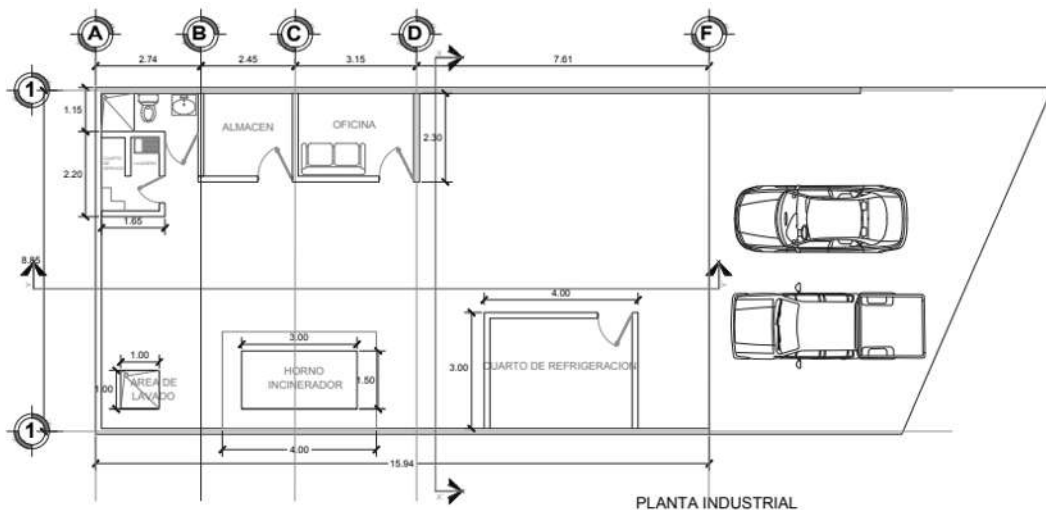


Figura 7.1. Plano arquitectónico de la planta incineradora

Fuente: Ficha técnica de proveedor

El desarrollo del VSM se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a) La primera etapa del VSM es la preparación, la cual consistió en un análisis del sistema-producto a estudiar.
- b) La siguiente etapa consistió en desarrollar el mapa del estado actual del sistema-producto, tomando en cuenta la información analizada. Que será visualizada a través del uso de la diferente simbología que se utiliza en el VSM.
- c) La tercera etapa consiste en diseñar el mapa del estado futuro, identificando los puntos que tienen una posibilidad de aplicar una mejora continua.
- d) Por último, se desarrolló una propuesta para poder implementar el mapa del estado futuro.

Para la realización del análisis se siguió la metodología de VSM y la simbología correspondiente. El desarrollo de cada etapa se detalla a continuación.

### **7.1.1 Objetivo del VSM**

Diseñar una propuesta para la reducción del tiempo en cada etapa del sistema-producto de la incineración de RPBI, con la finalidad de la disminución de consumo de recursos.

### **7.1.2 Mapa del estado actual del sistema-producto**

Para la realización del mapa del estado actual se utilizó la información del apartado 6.1 de este documento, que corresponde al proceso de incineración de RPBI en la planta incineradora, donde se muestra y se describe cada una de las etapas que se lleva a cabo dentro del proceso de incineración. Posteriormente las etapas fueron analizadas y seleccionadas de acuerdo al tipo de desperdicio que producen y de acuerdo a la posibilidad de mejora que existe. Esto permitió el desarrollo del VSM del escenario actual con respecto al consumo de recursos energéticos y al consumo de tiempo.

Una vez identificadas las etapas del proceso que entran al VSM, la simbología utilizada para interpretar el mapa se muestra en la Tabla 1.4 que se encuentra en el CAPÍTULO 1 de este documento. En la Figura 7.2 se muestra el mapa del estado actual del sistema-producto. Las etapas que se encuentran dentro sistema producto para que se lleve a cabo el proceso de incineración de RPBI son:

- Recepción y almacenamiento de residuos
- Preparación
- Proceso de incineración
- Trituración
- Pesar

De acuerdo con el VSM del estado actual del sistema-producto, la etapa que más tiempo y recursos energéticos demanda y donde se ve una oportunidad de mejora es la etapa de incineración. Es importante mencionar, que el factor principal por el cual las demás etapas no tienen oportunidad de mejora en este proceso, es debido a que se está hablando de un sistema-producto muy simplificado que no tiene procesos muy extensos ni grandes equipos.

Con los tiempos actuales, el sistema actual tiene una eficiencia del 64%. Lo que se busca al momento de aplicar una mejora en el sistema, es que la eficiencia aumente con el fin de ahorrar tiempos y recursos.

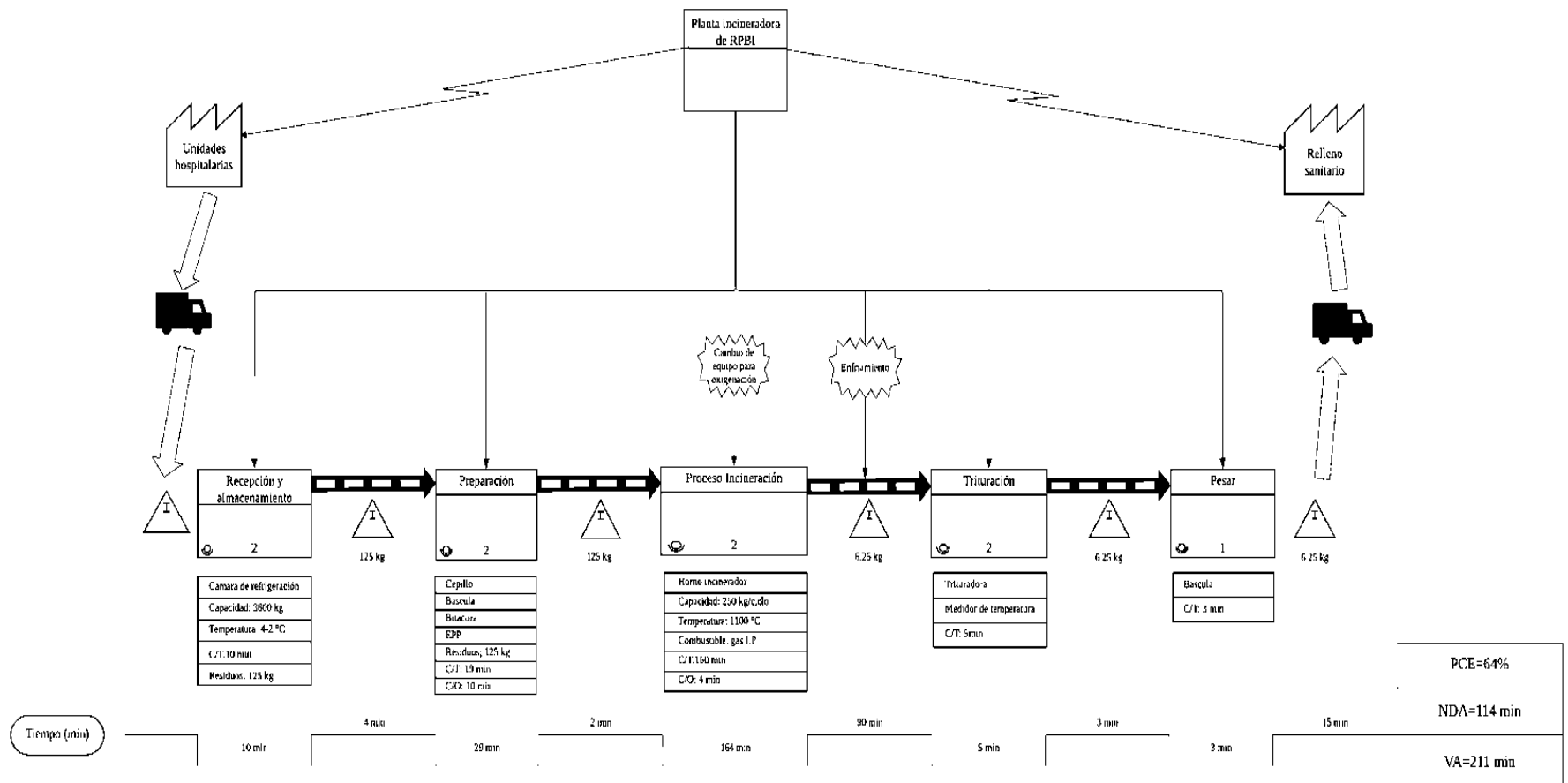


Figura 7.2 Mapa del estado actual del sistema-producto

Fuente: Elaboración propia

### 7.1.3 Mapa del estado futuro del sistema-producto

Con el diagrama y los datos obtenidos del VSM del estado actual del sistema-producto, se llevó a cabo el desarrollo del VSM del estado futuro del consumo de tiempo para la etapa de incineración y el enfriamiento (Figura 7.3). Se aplicó una mejora en el inventario que corresponde al enfriamiento del horno y cenizas, se colocó un ventilador de aire de 1/2 HP y 115 V, con lo esto se consiguió una reducción del tiempo de 60 min.

De acuerdo a la especificaciones del horno y al balance de materia y energía, se determinó la cantidad de combustible necesario estequiométricamente y el aire necesario para que se lleve a cabo la combustión de manera adecuada. Un ciclo se debería llevar a cabo en un tiempo de 75-86 min. Por lo tanto, para lograr este tiempo se propone un cambio de equipo para la alimentación de aire. El equipo utilizado en la etapa de incineración es un ventilador de aire de 1/2 HP y 115 V.

Tomando en cuenta los datos obtenidos del balance de materia y energía que se encuentra en el ANEXO I, se determinó que la cantidad de aire necesaria a suministrar en este sistema es la siguiente:

$$V = 3,413.71 \text{ L/min}$$

En la Tabla 7.1, se muestra una comparación de la variación de aire suministrado con equipos de diferentes capacidades y flujos de aire, de igual forma se muestra el consumo energético por equipo. En el caso del consumo energético de los equipos la diferencia es mínima. Por el contrario, el aire suministrado por los equipos varía de manera notoria, ya que el equipo actual se excede de manera significativa.

Tabla 7.1. Comparación de equipos

Equipo	Características	Flujo de aire (L/min)	Diferencia (L/min)	Consumo energético (kW)	Horas de uso	Consumo total (kWh)
Ventilador actual	Ventilador industrial 36	594650	591236.29	0.115	1:15	0.13225

	pulgadas Móvil 1/2 HP 115V					
Cambio de equipo	Soplador de aire de 5.5 HP de 12 galones de capacidad	2973.27	440.44	0.12	1:15	0.138
Sugerencia de equipo a utilizar	Soplador de aire de 6.5 HP de 16 galones de capacidad	3284.75	128.96	0.12	1:15	0.138

Con las propuestas de mejora en la etapa de incineración y el inventario que incluye el enfriamiento del horno y cenizas, se tendría una disminución del tiempo del proceso, por lo tanto, la eficiencia del proceso aumentaría a un 71%. Además, al disminuir el tiempo en el que se lleva a cabo la etapa de incineración se estaría disminuyendo el consumo de recursos energéticos (gas LP).

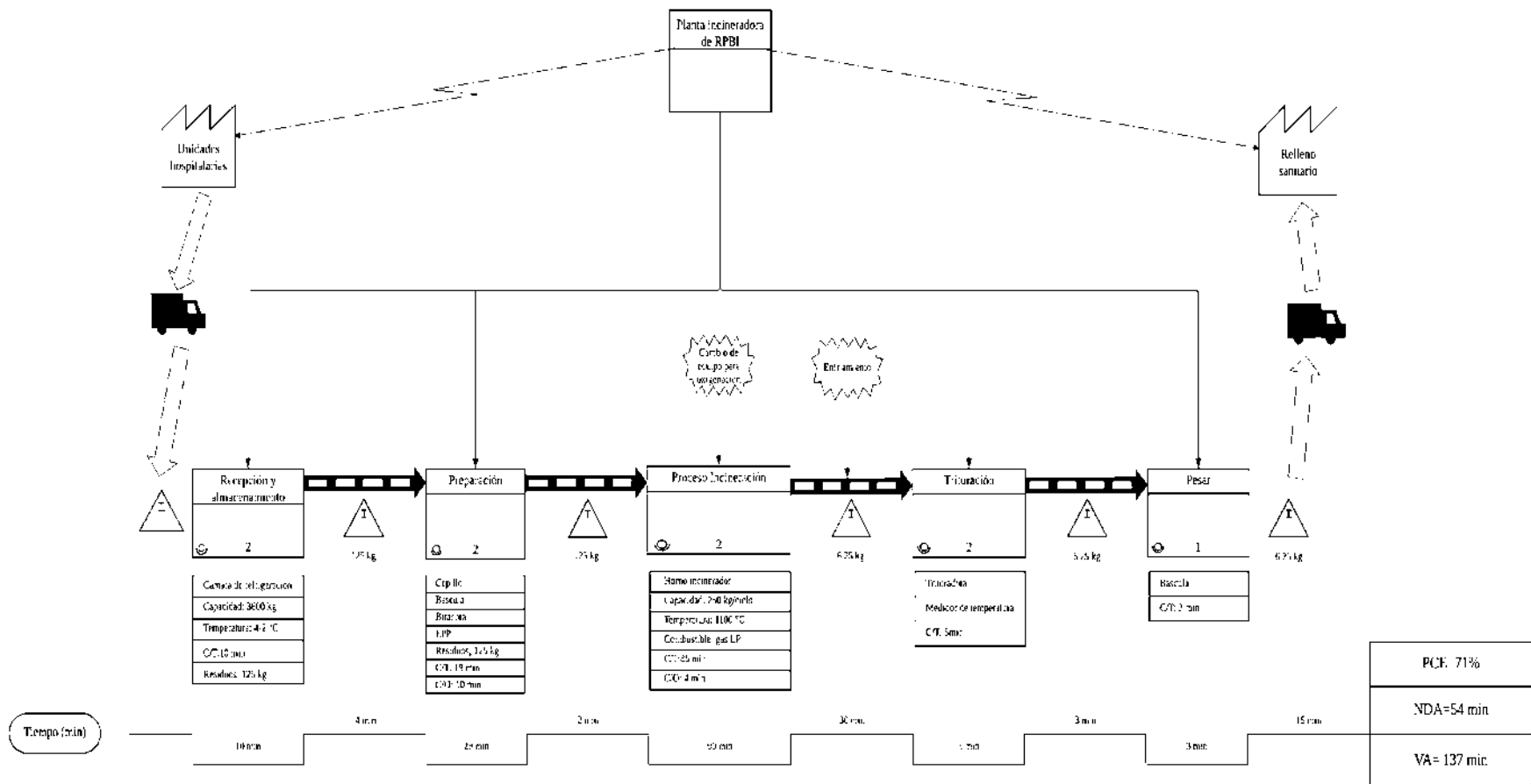


Figura 7.3 Mapa del estado futuro del sistema-producto

Fuente: Elaboración propia

El tiempo en el que se lleva a cabo el proceso de incineración varía entre 140 min a 180 min, relacionado con la oxigenación y la regulación de combustible. En la Tabla 7.2 se muestra los litros de gas LP consumidos con respecto al peso del residuo, estos datos fueron obtenidos mediante las bitácoras de registro de la planta incineradora. Los datos se graficaron para obtener la Ecuación 7.1 con la que se obtuvo que se necesitan 1,243.8 L de gas Lp para incinerar 1000 kg que son la unidad funcional.

Tabla 7.2 Datos del peso/gas

<b>Peso kg</b>	<b>% gas</b>
89.74	5
90	5
47.46	3
101.02	5
81.4	4.5
64.54	4
79.8	4.5
37.5	2.5
97.36	5
77.22	4
75	4
70	4
83	5
92	5
99	5.1
45	3
50	3
53	3.5
47	3.2
97	5
83	4.5
84	4.3

99	5
75	4
77	4
82	5

Fuente: Ficha técnica de proveedor

$$y = 0.0403x + 1.1667$$

$$R^2 = 0.9234$$

Ecuación 7.1

Teniendo en cuenta que en el sistema actual se pretende aplicar una mejora, se tomó como referencia la ficha técnica de un equipo incinerador que trabaja de manera eficiente (B&L Cremation Systems, s.f.). Este equipo cuenta con una cámara principal y una cámara secundaria, lo que sirvió como comparación para demostrar la mejora en el sistema actual, de igual forma se tomó en cuenta los datos del balance de materia y energía. La Tabla 7.3 muestra una comparación de los BTU consumidos del equipo actual, el equipo de referencia y del balance de materia y energía, tomando en cuenta que en ambos equipos se están incinerando 95 kg por lote de 83 min.

Tabla 7.3 Comparación de sistemas actual y de referencia

	Equipo actual	Equipo de referencia	De acuerdo al BMyE
<b>Cámara principal</b>	871,620.76 BTU/83 min	691,666.667 BTU/83 min	599,782.5 BTU/83 min
<b>Cámara secundaria</b>	1,743,241.53 BTU/83 min	1,383,333.333 BTU/83 min	1,199,565 BTU/83 min
<b>Total</b>	2,614,862.29 BTU/83 min	2,075,000.00 BTU/83 min	1,799,347.5 BTU/83 min

Fuente: Elaboración propia en base a ficha técnica de proveedor, (B&L Cremation Systems, s.f.).

Como se observa en la tabla anterior, la diferencia de consumo de un equipo a otro es significativa. En base a estos datos, se obtuvo que para incinerar de manera eficiente 1000 kg de residuos se necesitan **864.94 L de gas LP**, comparando con el resultado real utilizado (1243.8 L) se tendría un ahorro de **378.86 L/ton de residuos**, esto representaría un **30%** de ahorro en

combustible. De acuerdo al balance de materia y energía la cantidad de combustible utilizada para incinerar 1000 kg es de **750 L**, lo que significa que si el equipo trabaja de manera estequiométrica se tendrá un ahorro del 39% de ahorro.

Se utilizaron los resultados del ACV para realizar una comparación en la categoría de cambio climático. Por lo que en la Tabla 7.4, se muestran los resultados obtenidos del sistema en estado actual en comparación con el sistema con un ahorro de combustible.

Tabla 7.4 Comparación de la contribución a Cambio Climático

	<b>Gas Lp consumido (L/ton de residuo)</b>	<b>Contribución a cambio climático (Ton CO<sub>2</sub> eq/Ton de residuo)</b>	<b>Gas Lp consumido (L/año)</b>	<b>Contribución a cambio climático (Ton CO<sub>2</sub> eq/año)</b>
<b>Sistema actual</b>	1243.8	1.432	358,214.4	412.53
<b>Sistema con ahorro</b>	864.89	1.293	249,088.32	372.61
<b>Sistema estequiométrico</b>	750	1.016	216,000	292.808

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos del software SimaPro.

Para poder visualizar la magnitud del impacto al cambio climático y la diferencia del impacto si se consiguiera el ahorro del 30% o 39% en consumo de combustible, se utilizó un calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero (EPA, 2022). En la Figura 7.4, se muestran las equivalencias de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).



Figura 7.4 Equivalencias de emisiones de CO<sub>2</sub>

Fuente: elaboración propia en base a (EPA, 2022).

En base a lo anterior, se propuso la utilización de un equipo para regular el suministro de combustible y oxígeno. El uso de un equipo que permita regular la cantidad de combustible lo que nos llevará a un ahorro de recursos durante cada ciclo. El ahorro mostrado anteriormente pudiera ser no significativos, pero si tomamos en cuenta que al año se incineran 288 ton de residuos, la disminución de impacto al cambio climático ya es considerable.

# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

---

## Hipótesis

El cambio climático es el principal impacto ambiental provocado por la incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos, esto a causa de la emisión de gases contaminantes provenientes de la quema del combustible fósil.

Por lo tanto, proponer alternativas que permitan que sus procesos sean más eficientes disminuirá los impactos ambientales.

El aplicar la mejora continua permitirá visualizar la disminución de partículas volátiles (CO<sub>2</sub>) cuando el proceso trabaja de manera eficiente.

## Cumplimiento de objetivos

### Objetivo general

Determinar el impacto ambiental y los *hotspots* dentro del proceso de incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos en una planta incineradora.

- ✓ Objetivo cumplido

### Objetivos específicos

- Conceptualizar el problema de investigación.

- ✓ Objetivo cumplido

- Identificar los impactos significativos del proceso de incineración.

Una vez finalizada la etapa de EICV se llevó a cabo la fase de interpretación en la que se identificaron los impactos significativos. Se estimó que la incineración de RPBI tiene una contribución a la categoría de cambio climático de 1.04 ton de CO<sub>2</sub> eq/ton de residuos incinerados.

✓ Objetivo cumplido

- Plantear las medidas para la mejora del proceso.

En base a los resultados obtenidos del balance de materia y energía y la elaboración del mapeo de flujo de valor se determinaron las propuestas a realizar en el proceso de incineración. Se propuso la utilización de un sistema automatizado para el suministro de gas y oxigenación.

✓ Objetivo cumplido

# CONCLUSIONES

---

- Los resultados obtenidos muestran los impactos ambientales de la incineración de RPBI. Al aplicar la mejora continua se observó una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> como se muestra en la Figura 7.4. Motivo por el cual **la hipótesis es válida** para este sistema.
- Con el software SimaPro se pudieron obtener los resultados en la fase 3 EICV como se muestran en el apartado 6.5.3, se pudieron determinar los hotspots con una contribución mayor al 85% en emisiones de contaminantes (Tabla 6.9).
- De acuerdo a los hotspots la categoría de cambio climático es la que refleja mayor impacto, lo anterior debido a las emisiones del CO<sub>2</sub> y CO (Tabla 6.9). Por lo que establecimos el balance de masa (ANEXO I) para determinar la cantidad necesaria de flujo de aire para que la combustión sea completa. Para aumentar la eficiencia del proceso de combustión reduciendo el tiempo de operación por lo que se requiere menos combustible (Figura 7.3).

Esta investigación contribuye en los inicios de la evaluación del ciclo de vida de la incineración de RPBI en México, ya que no se han encontrado trabajos que aborden este tema en particular. En este trabajo se integra una metodología para la evaluación ambiental y mejora continua del proceso.

# PERSPECTIVAS

---

Aplicar este estudio a otros sistemas de incineración de RPBI

Aplicar a otros sistemas con diferente tipo de residuo

# CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																									
Actividades	SEMESTRE 1						SEMESTRE 2						SEMESTRE 3						SEMESTRE 4						
	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Elaboración de protocolo		■	■	■	■	■																			
Participación en el coloquio				■																					
Presentación de protocolo						■																			
Revisión de la ISO 14040						■	■	■																	
Revisión de la ISO 14044						■	■	■																	
Recopilación de datos								■	■	■	■														
Análisis de datos recopilados									■	■	■														
Balance de materia y energía									■	■	■														
Presentación de examen tutorial												■													
Visita a planta incineradora																						■	■		





# Bibliografía

- Ali, M., Wang, W., & Chaudhry, N. (2016). Application of life cycle assessment for hospital solid waste management: A case study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(10), 1012-1018. doi:10.1080/10962247.2016.1196263
- Anjaneyulu , Y., & Manickam, V. (2007). Environmental Impact Assessment Methodologies. En Y. Abjaneyulu , & V. Manickam, *Environmental Impact Assessment Methodologies* (Segunda ed., págs. 34-70). BS Publications. Recuperado el 3 de Julio de 2021
- B&L Cremation Systems*. (s.f.). Recuperado el 8 de Agosto de 2022, de B&L Cremation Systems: <https://blcremationsystems.com/n-20-crematory/>
- Battacharya, A., Nand, A., & Castka, P. (2019). Lean-green integration and its impact on sustainability performance: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117697>
- Beylot, A. M., Descat, M., Ménard, Y., & Villeneuve, J. (octubre de 2018). Life cycle assessment of the French municipal solid waste incineration sector. *Waste management*, 80, 144-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.037>
- Brunner, C. R. (1987). Hazardous air emissions from incineration. En C. Brunner, *Hazardous air emissions from incineration* (págs. 77-78). Chapman and Hall.
- Bukens, A. (2013). *Incineration Technologies*. Springer. doi:10.1007/978-1-4614-5752-7
- Campos Ortiz, P. (2011). Análisis de la Gestión de Residuos Peligrosos de Tipo Biológico Infeccioso Desde una Perspectiva de Política e Impacto Ambiental. Recuperado el 20 de diciembre de 2020, de <https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/628127/CEM336202.pdf?sequence=1>
- Castells, X. E. (2012). Sistemas de tratamiento térmico: la incineración. En J. E. Castells, *Xavier Elias Castells* (pág. 288). Recuperado el 29 de enero de 2021
- Chiarini, A. (2013). *Lean Organization: from the Tools of the Toyota Production System to Lean Office*. Bolongna, Italia: Springer. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021

- Danilin, O. L. (1999). Combustión. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de [https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-30\\_12-51-18108983.pdf](https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-30_12-51-18108983.pdf)
- DOF. (2003). NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. Obtenido de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/087ecolssa.html>
- Dües, C. M. (2013). Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 40, 93-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.023>
- EPA. (Marzo de 2022). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Recuperado el 10 de Agosto de 2022, de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero#results>
- Fercoq, A., Lamouri, S., Carbone, V., Lelièvre, A., & Lemieux, A. A. (2013). Combining lean and green in manufacturing: a model of waste management. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 117-122. doi:<https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00164>
- García San José, R. (Noviembre de 2001). Combustión y Combustibles. 3-6. Recuperado el 15 de Julio de 2021
- González Vivanco, M., Ayala Islas, D. E., & Vargas Pellicer, P. (2015). En un mar de residuos: el cambio necesario. *Cuadernos de divulgación ambiental*, 1, 8-9. México, DF, México. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002248.pdf>
- Guinée, J. B. (2004). *Handbook on Life Cycle Assessment* (Vol. 7). Kluwer Academic Publishers. Recuperado el 16 de Mayo de 2021
- Hernández, J. C., & Vizán, A. (2013). Lean manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación. Madrid. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20730/lean-manufacturing-concepto-tecnicas-e-implantacion>

- INECC. (2020). *Manejo de residuos durante la emergencia sanitaria por COVID-19*. Recuperado el 2021 de Enero de 28, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569684/Residuos\\_COVID.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569684/Residuos_COVID.pdf)
- Johansson, G., & Sundin, E. (2014). Lean and Green product development: two sides of the same coin? *Journal of Cleaner Production*, 85, 104-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.005>
- Juarez, C., Guereca, L., & Gasso, S. (2008). Análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos municipales de la ciudad de México. Recuperado el 29 de enero de 2021, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/14195/Gasso.pdf>
- King, P. L., & King, J. S. (2015). *VALUE STREAM MAPPING FOR THE PROCESS INDUSTRIES*. Taylor & Francis Group. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021
- Klein, L. L., Tonetto, M. S., Avila, L. V., & Moreira, R. (2020). Management of lean waste in a public higher education institution. *Journal of Cleaner Production*, 286. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125386>
- Klopffer, W. (2014). Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. 1-23. Springer Science. doi:10.1007/978-94-017-8697-3
- Klopffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practice*. WILEY-VCH. Recuperado el 17 de Mayo de 2021
- León López, A. A. (7 de abril de 2020). Gestión del tratamiento de los Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos en México. (1), 59-85. Recuperado el 26 de Abril de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/340477136\\_Gestion\\_del\\_tratamiento\\_de\\_los\\_Residuos\\_Peligrosos\\_Biologico-Infecciosos\\_en\\_Mexico/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/340477136_Gestion_del_tratamiento_de_los_Residuos_Peligrosos_Biologico-Infecciosos_en_Mexico/citation/download)
- Locher, D. (2008). *Value stream mapping the development process: a how-to guide for streamlining time to market*. Taylor & Francis Group. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021
- Marin Garcia, J. A. (2008). Análisis de programas de mejora continua. Un estudio longitudinal en una empresa industrial. *Gest. Prod., São Carlos*, 15(3), 433-447. doi:<https://doi.org/10.1590/S0104-530X2008000300002>

- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). Mejores Técnicas Disponibles de referencia Europea para Incineración de Residuos. En M. d. Marino, *Mejores Técnicas Disponibles de referencia Europea para Incineración de Residuos* (págs. 38-39). Madrid, España. Recuperado el 2 de Julio de 2021, de [https://prtr-es.es/Data/images/MTD\\_Incineracion\\_residuos\\_ES.pdf](https://prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf)
- Mohamed, F. M. (2015). Evaluación de los impactos ambientales de una incineradora de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía mediante el análisis de ciclo de vida. Recuperado el 29 de enero de 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/62909085.pdf>
- Morelos Ramírez, R., Ramírez Pérez, M., Sánchez Dorantes, G., Chavarín Rivera, C., & Meléndez Herrada, E. (2014). El trabajador de la salud y el riesgo de enfermedades infecciosas adquiridas. Las preocupaciones estándar y de bioseguridad. *Revista de la Facultad de medicina*, 57(4), 34-42. Recuperado el 28 de octubre de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0026-17422014000400034&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422014000400034&lng=es&tlng=es)
- Niessen, W. R. (2002). *Combustion and Incineration Process*. (Tercera ed.). Taylor & Francis Group. Recuperado el 29 de enero de 2021, de <https://dokumen.tips/documents/walter-r-niessen-combustion-and-incineration-prbookfiorg.html>
- Niessen, W. R. (2010). *Combustion and Incineration Processes. Applications in Environmental Engineering*. 4. CRC Press. Recuperado el 5 de Agosto de 2021
- Peng Au-Yong, C., Farhana Azmi, N., & Elyna Myeda, N. (30 de Marzo de 2022). Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept. *Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131608>
- PROFEPA. (27 de abril de 2020). Profepa verifica el correcto manejo de los Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI). Recuperado el 26 de Noviembre de 2020, de <https://www.gob.mx/profepa/articulos/profepa-verifica-el-correcto-manejo-de-los-residuos-peligrosos-biologico-infecciosos-rpbi?idiom=es>

- PROFEPA. (2020). Trabajo en tiempos de pandemia, COVID 19. *MiPROFEPA(2)*. Recuperado el 3 de Julio de 2021, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/597578/Revista\\_Mi\\_PROFEPA\\_No\\_2\\_\\_7\\_Dic2020\\_finalchica\\_\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/597578/Revista_Mi_PROFEPA_No_2__7_Dic2020_finalchica__.pdf)
- Reinhardt, P. A., & Gordon, J. G. (2018). *Infectious and Medical Waste Management*. LEWIS PUBLISHERS, INC. Recuperado el 11 de Julio de 2021
- Romero Rodríguez, B. I. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. *Tendencias Tecnológicas*, 91-97. Recuperado el 6 de Julio de 2021, de <https://www.ineel.mx/boletin032003/tend.pdf>
- Rosas Domínguez, A., Peña Luna, A., Ramos Rodríguez, G., Izumikawa, C., Aguilar, G., Velasco Trejo, J., . . . Salgado Figueroa, P. (2003). Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. *Gaceta Ecológica*(66), 27-40. Recuperado el 30 de Junio de 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906603>
- Rueda, J. (2013). Recuperado el 21 de Diciembre de 2021, de <http://mapadelflujodevalor.blogspot.com/2013/11/ventajas-y-desventajas.html>
- Sánchez, O. J., Cardona, C. A., & Sánchez, D. L. (2007). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol. Una aproximación cualitativa. *Universidad Eafit*, 43(146), 59-79. Recuperado el 14 de Diciembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514606.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005. 0-1. Recuperado el 10 de octubre de 2020, de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Gobierno de México*. Recuperado el 27 de enero de 2021, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/tramites/ficha/tratamiento-de-residuos-peligrosos/SEMARNAT325>

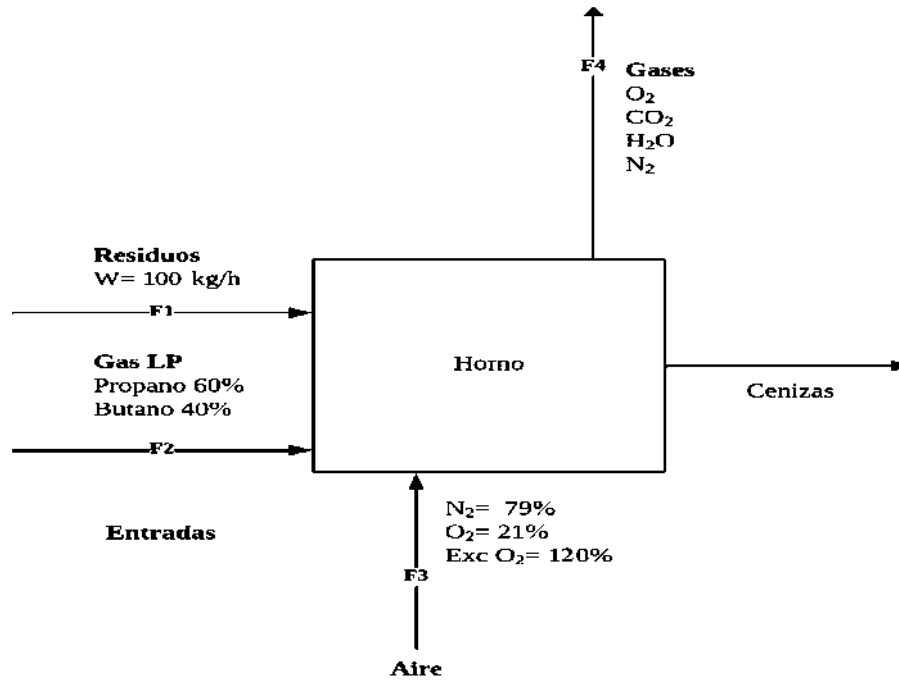
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Semarnat, México. Recuperado el 28 de enero de 2021, de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap7\\_Residuos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Semarnat, México. Recuperado el 12 de octubre de 2020, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- SEMARNAT. (2012). Guía Técnica para la Elaboración del Protocolo de Pruebas de Incineración de Residuos Peligrosos, Validación y Presentación de Resultados. 1. México. Recuperado el 3 de Julio de 2021
- SEMARNAT y SSA. (2007). Guía de cumplimiento de la norma oficial mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA-2002. 29-31. Recuperado el 21 de enero de 2021, de [https://www.cuautitlan.unam.mx/descargas/cicuae/GUIA\\_SEMARNAT\\_MANEJO\\_RPBI.pdf](https://www.cuautitlan.unam.mx/descargas/cicuae/GUIA_SEMARNAT_MANEJO_RPBI.pdf)
- Soriano Parra, L., Ruiz Rivera, M. E., & Ruiz Lizama, E. (2015). Criterios de evaluación de impacto ambiental del sector minero. *Industrial Data*, 18(2), 99-112. Recuperado el 3 de Julio de 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81643819013>
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). Handbook of Solid Waste Management. En G. Tchobanoglous, & F. Kreith, *Handbook of Solid Waste Management* (págs. 495-494). MacGraw-Hill. Recuperado el 3 de Mayo de 2021
- Turconi, R., Butera, S., Boldrin, A., & Grosso, M. (septiembre de 2011). Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29, 78-90. doi:10.1177/0734242X11417489
- Vigon, B. W., Tolle, D. A., & Latham Batelle-Columbus, H. C. (2000). Life Cycle Assessment Inventory Guidelines and Principles. En *Life Cycle Assessment Inventory Guidelines and Principles* (págs. 1-4). Lewis Publishers. Recuperado el 4 de Julio de 2021

- Viloria Villegas, M. I., Cadavid, L., & Award, G. (2018). Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(2), 121-156. doi:<https://doi.org/10.18359/rcin.2941>
- Yáñez Vargas, A. (2008). Impacto Ambiental y Metodologías de Análisis. *BIOCYT*, 1(2), 7-15. doi:[10.22201/fesi.20072082.2008.1.16844](https://doi.org/10.22201/fesi.20072082.2008.1.16844)
- Zarea, M. A., Moazed, H., Ahmadmoazzam, M., Malekghasemi, S., & Jaafarzadeh, N. (2019). Life cycle assessment for municipal solid waste management: a case study from Ahvaz, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3). doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7273-y>

# ANEXOS

## ANEXO I

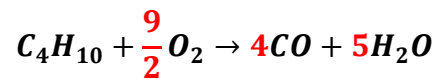
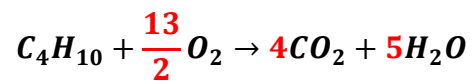
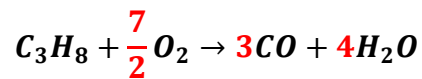
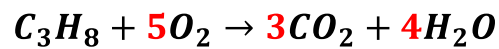
### Balance de materia y energía del horno incinerador



### Balance de residuos

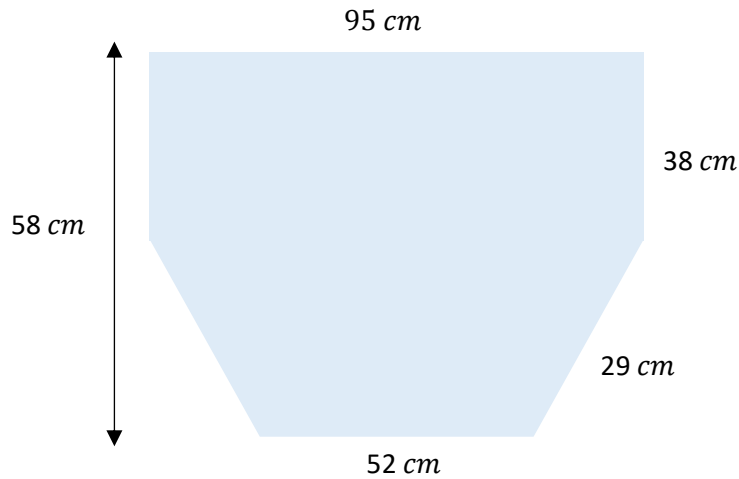
NOTA: Proponiendo una conversión de residuos del 98%.

#### REACCIONES

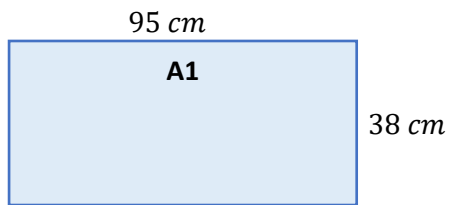


$$Cenizas = \left(1000 \frac{Kg}{h}\right) * (2\%) = 20 \frac{Kg}{d}$$

✚ Cálculo de área y volumen del horno



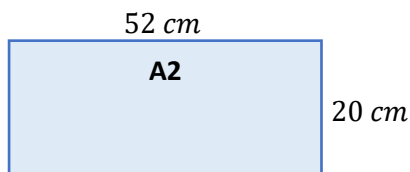
**Cálculo de área 1**



$$A1 = 95cm \times 38cm$$

$$A1 = 3610 cm^2$$

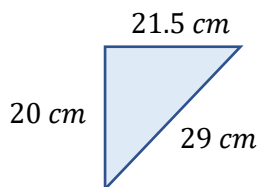
**Cálculo de área 2**



$$A2 = 52 cm \times 20 cm$$

$$A2 = 1040 cm^2$$

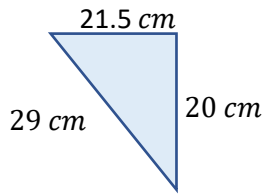
**Cálculo de área 3**



$$A3 = \frac{21.5 cm \times 20 cm}{2}$$

$$A3 = 215 cm^2$$

#### Cálculo de área 4



$$A4 = \frac{21.5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}}{2}$$
$$A4 = 215 \text{ cm}^2$$

#### Área total

$$AT = 3610 \text{ cm}^2 + 1040 \text{ cm}^2 + 215 \text{ cm}^2 + 215 \text{ cm}^2$$

$$AT = 5080 \text{ cm}^2$$

$$AT = 0.508 \text{ m}^2$$

Largo del horno = 2.8 m

#### Cálculo del volumen

$$V = 0.20575 \text{ m}^2 \times 3.2 \text{ m}$$

$$V = 1.4224 \text{ m}^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{masa}} = 0.7112 \text{ m}^3 \\ V_{\text{aire}} = 0.7112 \text{ m}^3 \end{array} \right.$$

$$V_{\text{aire}} = 711.2 \text{ L}$$

#### ✚ Cálculo del número de moles de aire

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$V_{\text{aire}} = 711.2 \text{ L}$$

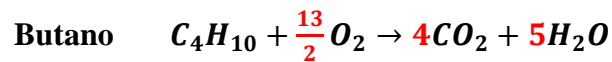
$$T = 25^\circ\text{C} = 298.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

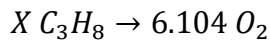
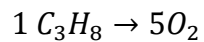
$$R = 0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$n = \frac{(1 \text{ atm})(711.2 \text{ L})}{\left(0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(298.15 \text{ K})}$$

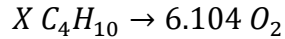
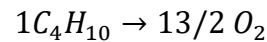
$$n = 29.069 \text{ mol} \quad \text{Aire} \quad \left\{ \begin{array}{l} 21\% \text{ O}_2 = 6.104 \text{ mol} \\ 79\% \text{ N}_2 = 22.96 \text{ mol} \end{array} \right.$$



### Reacciones completas

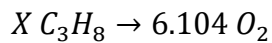
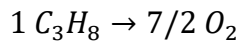


$$X \text{ C}_3\text{H}_8 = 1.22$$

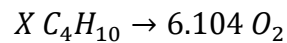
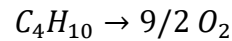


$$X \text{ C}_4\text{H}_{10} = 0.94$$

### Reacciones incompletas



$$X \text{ C}_3\text{H}_8 = 1.74$$



$$X \text{ C}_4\text{H}_{10} = 1.36$$

### Oxígeno teórico total

$$\text{O}_2 \text{ Teórico Total} = 24.42$$

$$\text{O}_2 120\% \text{ EXC} = 29.301$$

### ✚ Cálculo de moles consumidas de butano y propano

**NOTA:** Proponiendo una conversión del 93% para ambos (propano y butano).

$$F = \frac{\text{moles consumidas}}{\text{moles suministradas}}$$

$$F = 0.93$$

$$\text{mol cons.} = (F)(\text{mol suministradas})$$

$$\text{mol cons. } C_3H_8 = (0.93)(1.3607 \text{ mol } C_3H_8) = 2.76 \text{ mol } C_3H_8$$

$$\text{mol cons. } C_4H_{10} = (0.93)(1.0605 \text{ mol } C_4H_{10}) = 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}$$

**NOTA:** Proponiendo las conversiones para las reacciones completas e incompletas de 60% y 40% respectivamente



### Propano

$$O_2 = \frac{5 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.6) = 8.272 \text{ mol } O_2$$

$$O_2 = \frac{7/2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.4) = 3.86 \text{ mol } O_2$$

$$\text{Total} = 12.13 \text{ mol } O_2$$

### Butano

$$O_2 = \frac{13/2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.6) = 8.33 \text{ mol } O_2$$

$$O_2 = \frac{9/2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.4) = 3.84 \text{ mol } O_2$$

$$\text{Total} = 12.17 \text{ mol } O_2$$



### Propano

$$CO_2 = \frac{3 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.6) = 4.96 \text{ mol } CO_2$$

### Butano

$$CO_2 = \frac{4 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.6) = 5.12 \text{ mol } CO_2$$

### H<sub>2</sub>O

#### Propano

$$H_2O = \frac{4 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.6) = 6.62 \text{ mol } H_2O$$

$$H_2O = \frac{4 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.4) = 4.41 \text{ mol } H_2O$$

$$\text{Total} = 11.03 \text{ mol } H_2O$$

#### Butano

$$H_2O = \frac{5 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.6) = 6.40 \text{ mol } H_2O$$

$$H_2O = \frac{5 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.4) = 4.27 \text{ mol } H_2O$$

$$\text{Total} = 10.67 \text{ mol } H_2O$$

### CO

#### Propano

$$CO = \frac{3 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} \times 2.76 \text{ mol } C_3H_8(0.4) = 3.31 \text{ mol } CO$$

#### Butano

$$CO = \frac{4 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \times 2.13 \text{ mol } C_4H_{10}(0.4) = 3.42 \text{ mol } CO$$

### Balances

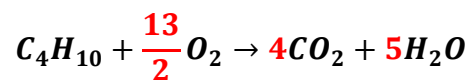
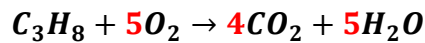
	ENTRADA +	GENERA -	SALIDA -	CONSUME =0	SALIDA	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.965	0	S	2.75	0.207	mol C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.296	0	S	2.13	0.160	mol C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
O <sub>2</sub>	29.30	0	S	24.30	5.00	mol O <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	0	10.09	S	0	10.09	mol CO <sub>2</sub>

<b>H<sub>2</sub>O</b>	0	21.70	S	0	21.70	mol H <sub>2</sub> O
<b>CO</b>	0	6.72	S	0	6.72	mol CO
<b>N<sub>2</sub></b>	E=S				22.96	mol N <sub>2</sub>

### ✚ Balance de energía

**NOTA:** Proponiendo una alimentación a 50°C y 1 atm y productos a 300°C y 1 atm

### Cálculo de entalpías de reacción



$$\Delta H_{j(C_3H_8)}^\circ = -103.8 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H_{j(O_2)}^\circ = 0$$

$$\Delta H_{j(CO_2)}^\circ = -393.5 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H_{j(C_4H_{10})}^\circ = -124.7 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H_{j(H_2O)}^\circ = -241.83 \text{ KJ/mol}$$

Datos: Tabla B.1 del felder

$$\Delta H_c^\circ = \sum n_p \Delta H_{jp}^\circ - \sum n_r \Delta H_{jr}^\circ$$

$$\Delta H_c^\circ = 3 \left( -393.5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 4 \left( -241.83 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) - 1 \left( -124.7 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right)$$

$$\Delta H_c^\circ = -2044.02 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H_c^\circ = 4 \left( -393.5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 5 \left( -241.83 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) - 1 \left( -124.7 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right)$$

$$\Delta H_c^\circ = -2658.45 \text{ KJ/mol}$$

✚ Cálculo de entalpías específicas de cada compuesto

$$\hat{H} = \int_{T_{ref}}^{T_{ent}} C_p dT$$

$$C_p = (a + bT + cT^2 + dT^3)$$

$$\hat{H} = a(T_{ent} - T_{ref}) + \frac{b(T_{ent}^2 - T_{ref}^2)}{2} + \frac{c(T_{ent}^3 - T_{ref}^3)}{3} + \frac{d(T_{ent}^4 - T_{ref}^4)}{4}$$

C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		O <sub>2</sub>	
a=	68.032x10 <sup>-3</sup>	a=	92.30x10 <sup>-3</sup>	a=	29.10x10 <sup>-3</sup>
b=	22.59x10 <sup>-5</sup>	b=	27.88x10 <sup>-5</sup>	b=	1.158x10 <sup>-5</sup>
c=	-13.11x10 <sup>-8</sup>	c=	-15.47x10 <sup>-8</sup>	c=	-0.6076x10 <sup>-8</sup>
d=	31.71x10 <sup>-12</sup>	d=	34.98x10 <sup>-12</sup>	d=	1.311x10 <sup>-12</sup>

$$\hat{H}_1 = 68.032x10^{-3}(50 - 25) + \frac{22.59x10^{-5}(50^2 - 25^2)}{2} + \frac{-13.11x10^{-8}(50^3 - 25^3)}{3} + \frac{31.71x10^{-12}(50^4 - 25^4)}{4}$$

$$\hat{H}_1 = 1.91 \text{ KJ/mol}$$

$$\hat{H}_2 = 92.30x10^{-3}(50 - 25) + \frac{27.88x10^{-5}(50^2 - 25^2)}{2} + \frac{-15.47x10^{-8}(50^3 - 25^3)}{3} + \frac{34.98x10^{-12}(50^4 - 25^4)}{4}$$

$$\hat{H}_2 = 2.6 \text{ KJ/mol}$$

$$\hat{H}_3 = 29.10x10^{-3}(50 - 25) + \frac{1.158x10^{-5}(50^2 - 25^2)}{2} + \frac{-0.6076x10^{-8}(50^3 - 25^3)}{3} + \frac{1.311x10^{-12}(50^4 - 25^4)}{4}$$

$$\hat{H}_3 = 0.74 \text{ KJ/mol}$$

$$\widehat{H}_4 = 68.032 \times 10^{-3}(50 - 25) + \frac{22.59 \times 10^{-5}(300^2 - 25^2)}{2} + \frac{-13.11 \times 10^{-8}(300^3 - 25^3)}{3} + \frac{31.71 \times 10^{-12}(300^4 - 25^4)}{4}$$

$$\widehat{H}_4 = 27.69 \text{ KJ/mol}$$

$$\widehat{H}_5 = 92.30 \times 10^{-3}(300 - 25) + \frac{27.88 \times 10^{-5}(300^2 - 25^2)}{2} + \frac{-15.47 \times 10^{-8}(300^3 - 25^3)}{3} + \frac{34.98 \times 10^{-12}(300^4 - 25^4)}{4}$$

$$\widehat{H}_5 = 36.52 \text{ KJ/mol}$$

Valores sacados de tablas del libro de Felder y Rousseau

$$\widehat{H}_6 = 8.47 \text{ KJ/mol}$$

$$\widehat{H}_7 = 11.58 \text{ KJ/mol}$$

$$\widehat{H}_8 = 9.57 \text{ KJ/mol}$$

$$\widehat{H}_9 = 8.12 \text{ KJ/mol}$$

**NOTA:** Tomando un estado de referencia de gas a 25°C y 1 atm

Sustancia y fase	Estado de referencia	Entrada			Salida		
		$\dot{n}_i$ (mol/h)	$\hat{H}_i$ (KJ/mol)		$\dot{n}_i$ (mol/h)	$\hat{H}_i$ (KJ/mol)	
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	Gas a 25° C y 1 atm	2.965	H1	1.91	0.208	H4	27.69
<b>C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	Gas a 25° C y 1 atm	2.296	H2	2.6	0.16	H5	36.52
<b>O<sub>2</sub></b>	Gas a 25° C y 1 atm	29.301	H3	0.74	5.00	H6	8.47
<b>CO<sub>2</sub></b>	Gas a 25° C y 1 atm	0	---	---	10.09	H7	11.58
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Vapor a 25° C y 1 atm	0	---	---	21.70	H8	9.57
<b>N<sub>2</sub></b>	Gas a 50° C y 1 atm	22.96	0	0	22.96	H9	8.12

#### 🔗 Cálculo del grado de avance de las reacciones

$$\varepsilon = 2.965 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 0.208 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 2.757 \text{ mol/h}$$

$$\varepsilon = 2.296 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 0.16 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 2.135 \text{ mol/h}$$

✚ **Cálculo del calor desprendido**

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = \sum \text{reacciones } \varepsilon_j \Delta H_{rj}^\circ + \sum \text{salida } \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum \text{entrada } \dot{n}_i \hat{H}_i$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \Delta \dot{H} = & \left( 2.757 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( -2044.02 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 2.135 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( -2658.45 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) \right) \\ & + \left( 0.208 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 27.69 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 0.16 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 36.52 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 5.0 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 8.47 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \right) \right) \\ & + 10.09 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 11.58 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + 21.70 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \left( 9.57 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 22.96 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 8.12 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) \\ & - \left( 2.965 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 1.91 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 2.296 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 2.6 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 29.301 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \left( 0.74 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = -10780.26 \text{ KJ/mol}$$

## ANEXO II

### Análisis de la incineración de cadáveres

Los resultados del análisis de la incineración de cadáveres se muestran en la Figura 0.1, se observa que la etapa de uso es la más significativa con el 95% de contribución de impacto. Cabe mencionar que el flujo de referencia para este análisis es de 33.6 ton incineradas durante un año, tomando en cuenta que se incineran dos cadáveres por día.

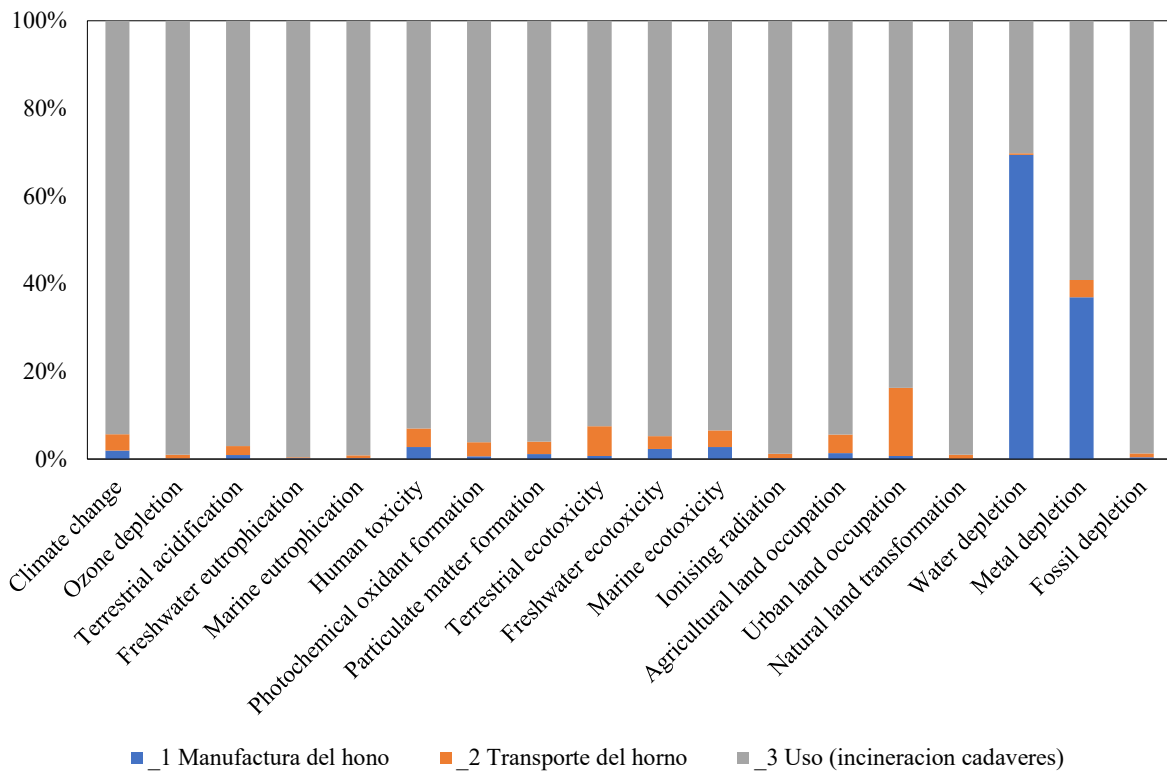


Figura 0.1. Potenciales impactos