



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA
DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS
SÓLIDOS PELIGROSOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

PAULINA PONCE EGUILUZ



MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: M.I. José Antonio Ortiz Ramírez**
VOCAL: **Profesor: Dra. Irma Cruz Gavilán García**
SECRETARIO: **Profesor: Dr. Alfonso Durán Moreno**
1er. SUPLENTE: **Profesor: Ing. Federico Carlos Hernández Chavarría**
2° SUPLENTE: **Profesor: Ing. Ileana Rodríguez Castañeda**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, TORRE DE INGENIERÍA
3ER PISO ALA SUR. CIUDAD UNIVERSITARIA 04510, COYOACÁN, MÉXICO
D.F.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUPERVISOR TÉCNICO:

Ing. Carlos Alberto Ibarra Aguilar

SUSTENTANTE:

Paulina Ponce Eguiluz

ÍNDICE

ABREVIATURAS.....	VIII
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Problemática	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo general	4
1.4 Objetivos particulares.....	4
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1 Evaluación de proyectos	5
2.1.1 Estudios de factibilidad	6
2.1.2 Parámetros para determinar la rentabilidad de un proyecto	8
2.2 Diagnóstico de la situación actual de los residuos peligrosos.....	12
2.2.1 Generación de residuos peligrosos	12
2.2.2 Manejo integral de residuos peligrosos	17
2.2.3 Normatividad.....	24
2.3 Incineración.....	28
2.3.1 Horno rotatorio.....	30
2.3.2 Exceso de aire	31
2.3.3 Combustibles.....	33
2.3.4 Tiempo de residencia	35
2.3.5 Lavado de gases	36
2.3.6 Recuperación de energía	44
3. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	47
3.1 Descripción del sistema piloto.....	48
3.1.1 Alimentación de residuos peligrosos	48
3.1.2 Cámaras de combustión.....	49

3.1.3	Sistema de control de emisiones	49
3.1.4	Recuperación de energía	49
3.2	Experiencia operacional que respalda la propuesta de incineración de RP.	50
3.3	Caso de estudio	52
3.3.1	Premisas.....	53
3.3.2	Descripción del proceso	55
3.3.3	Diagrama de flujo de proceso del sistema de incineración de RP	58
4.	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	59
4.1	Evaluación técnica-ambiental.....	60
4.1.1	Simulación del sistema de incineración	60
4.1.2	Análisis de la viabilidad técnica y ambiental	60
4.2	Evaluación económica	60
4.2.1	Estimación de los costos de inversión, operación y mantenimiento ..	61
4.2.2	Generación de flujo de efectivo	61
4.2.3	Cálculo de indicadores de rentabilidad	61
5.	RESULTADOS DEL ESTUDIO A NIVEL PERFIL.....	62
5.1	Evaluación técnica-ambiental.....	62
5.1.1	Simulación del sistema de incineración	62
5.1.2	Análisis de la viabilidad técnica-ambiental.....	72
5.2	Evaluación económica	75
5.2.1	Estimación de los costos de inversión, operación y mantenimiento ..	75
5.2.2	Generación de flujo de efectivo	78
5.2.3	Cálculo de indicadores de rentabilidad	80
5.2.4	Análisis de la viabilidad económica	80
5.3	Consideraciones sociales.....	84
6.	CONCLUSIONES	85
7.	BIBLIOGRAFÍA	87

8. ANEXOS	92
8.1 Características que definen a un residuo como peligroso.....	92
8.2 Incineradores autorizados por la SEMARNAT	95
8.3 Balance de materia	96
8.4 Metodología de cálculo de costos de inversión.....	97
8.5 Referencias costos de servicios auxiliares.....	101
8.6 Estado de resultados proforma	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo de vida de un proyecto.	5
Figura 2.	Generación de RP reportada por tipo de residuo.	16
Figura 3.	Estrategia Jerarquizada de residuos	17
Figura 4.	Porcentaje de distribución de incineradores de RP en México.....	27
Figura 5.	Esquema de horno de parrilla móvil	29
Figura 6.	Esquema de horno de lecho fluidizado.....	29
Figura 7.	Esquema de horno rotatorio	30
Figura 8.	Curva de temperatura con aire en exceso.....	32
Figura 9.	Estructura molecular de dibenzo-p-dioxinas policlorados.....	38
Figura 10.	Estructura molecular de dibenzofuranos policlorados.	38
Figura 11.	Mecanismo de separación de partículas mediante ciclón.	39
Figura 12.	Mecanismo de separación de partículas mediante filtro.....	40
Figura 13.	Mecanismo de separación de partículas mediante precipitador electrostático	41
Figura 14.	Caldera de tubos de humo	45
Figura 15.	Caldera de tubos de agua	46
Figura 16.	Diagrama del proceso de incineración de RP propuesto.....	52
Figura 17.	Metodología propuesta para realizar es estudio de factibilidad a nivel perfil del sistema de incineración de RP	59
Figura 18.	Captura de pantalla de la simulación de combustión de RP.	67
Figura 19.	Captura de pantalla de la simulación del abatimiento de NOx.	68
Figura 20.	Captura de pantalla de la simulación de recuperación de energía y producción de vapor.....	68

Figura 21.	Captura de pantalla de la simulación del abatimiento de gases ácidos	69
Figura 22.	Simulación del proceso de incineración de RP en Aspen Plus®....	71
Figura 23.	Comparación de emisiones con respecto a la NOM-098-SEMARNAT- 2002.	74
Figura 24.	Balance de insumos, productos y servicios auxiliares.....	79
Figura 25.	Análisis de sensibilidad para VPN.....	81
Figura 26.	Análisis de sensibilidad para TIR	82
Figura 27.	Esquema de equipos mayores y sus grupos de clasificación.....	97
Figura 28.	Esquema de materiales y equipos auxiliares de instalación.....	97
Figura 29.	Metodología general para la estimación del costo directo de inversión	98
Figura 30.	Indicadores económicos del Chemical Engineering.	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Estimaciones de la generación de RP en México.....	13
Tabla 2.	Generación estimada de RP por entidad federativa de acuerdo al número de empresas registradas en el Padrón de Generadores, 2004-2013.....	15
Tabla 3.	Ventajas y desventajas del uso de tratamientos térmicos	23
Tabla 4.	Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.....	25
Tabla 5.	Poder calorífico de diversos materiales	33
Tabla 6.	Propiedades de combustibles convencionales	35
Tabla 7.	Equipos utilizados en la limpieza de gases	43
Tabla 8.	Características principales del sistema de incineración a nivel piloto	48
Tabla 9.	Plantas de incineración en Europa que cuentan con tecnología de horno rotatorio.....	51
Tabla 10.	Condiciones de operación señaladas por la normatividad mexicana	53
Tabla 11.	Premisas económicas.....	54
Tabla 12.	Lista preliminar de equipos.....	57
Tabla 13.	Composición elemental de la alimentación de RP.....	63
Tabla 14.	Análisis elemental extraído del libro Hazardous Air Emissions from Incineration	64
Tabla 15.	Análisis elemental extraído del libro Waste Managment Practices....	64
Tabla 16.	Análisis elemental extraído del artículo Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant.....	64
Tabla 17.	Análisis elemental que presenta la planta piloto.....	65
Tabla 18.	Composición elemental de la alimentación de RP	65
Tabla 19.	Descripción de bloques de Aspen Plus® utilizados en la simulación.	70
Tabla 20.	Composición y temperatura estimada por la simulación del proceso	72

Tabla 21.	Determinación de costos de inversión	76
Tabla 22.	Estimado de inversión para el proyecto	77
Tabla 23.	Costos y beneficios para el proyecto	78
Tabla 24.	Indicadores de rentabilidad del proyecto	80
Tabla 25.	Análisis de sensibilidad para VPN (USD)	81
Tabla 26.	Análisis de sensibilidad para VPN (Porcentual).....	82
Tabla 27.	Análisis de sensibilidad para TIR (porcentual).....	83
Tabla 28.	Distribución de incineradores de residuos peligrosos en México por entidad federativa.....	95
Tabla 29.	Matriz de suministros.....	100
Tabla 30.	Matriz de instalaciones para los equipos y materiales utilizados.....	100
Tabla 31.	Referencias costos y beneficios para el proyecto.....	101
Tabla 32.	Estado de resultados proforma.....	102
Tabla 33.	Estado de resultados proforma (continuación)	103
Tabla 34.	Estado de resultados proforma (continuación)	104

ABREVIATURAS

CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
COA	Cédula de Operación Anual
CRETIB	Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico-infeccioso
EPA	Environmental Protection Agency
INE	Instituto Nacional de Ecología
LAU	Licencia Ambiental Única
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LPGGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
MXN	Peso Mexicano
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
PBC	Policlorobifenilos o bifenilos policlorados
PCDD	Dibenzo-p-dioxinas policlorados
PCDF	Dibenzofuranos policlorados
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PGRP	Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos
PRI	Periodo de Recuperación de la Inversión
RP	Residuos Peligrosos
RPBI	Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos
SCR	Reducción Selectiva Catalítica
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SNCR	Reducción Selectiva No Catalítica
TIR	Tasa Interna de Retorno
USD	Dólares Estadounidenses
VPN	Valor Presente Neto
WTE	Waste to Energy

RESUMEN

El presente trabajo planteó como objetivo evaluar la factibilidad a nivel perfil de un sistema de incineración de residuos peligrosos (RP).

El tratamiento térmico de residuos peligrosos con recuperación de calor (Waste to Energy, WTE) proporciona una alternativa para la correcta disposición de residuos peligrosos y disminución del volumen original de los mismos, teniendo a su vez un efecto notable en la reducción del uso de combustibles fósiles debido a que favorece el reciclaje energético mediante el uso de los residuos como combustible alternativo, siendo este proceso capaz de cumplir con los límites de emisiones existentes marcados por la normatividad.

El análisis técnico y ambiental del sistema se centra en el desarrollo de una simulación computacional del proceso de incineración de residuos peligrosos, limpieza de gases de combustión y recuperación de energía en forma de calor mediante el uso del software especializado en procesos químicos Aspen Plus®.

El modelo propuesto se desarrolló para obtener un balance de materia preliminar con la finalidad de poder analizar y cuantificar las emisiones de contaminantes derivadas de la combustión de RP y así definir los equipos necesarios para desarrollar un estimado de inversión a nivel de Ingeniería Conceptual.

A partir de los resultados obtenidos, se determinaron parámetros de rentabilidad (VPN, TIR y PRI), identificando a su vez las variables con mayor impacto en la rentabilidad del proyecto mediante un análisis de sensibilidad.

El análisis realizado permitió demostrar la factibilidad de implementación de un sistema de incineración de residuos peligrosos en México considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta la problemática y justificación que dan origen a este trabajo, así como el objetivo general y objetivos particulares del documento.

1.1 Problemática

Hoy en día la disposición de residuos es uno de los principales problemas en las grandes urbes y en la industria, debido al aumento en la generación de los mismos como producto de sus actividades. Para el periodo 2004-2013 se generaron 2.03 millones de toneladas de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2014) por lo que es necesario tener un control ambiental y crear conciencia sobre su manejo de manera responsable.

El no contar con infraestructura necesaria para el tratamiento y confinamiento de residuos peligrosos propicia malas prácticas debido a una incorrecta disposición, teniendo como consecuencia impactos negativos a la salud y el ambiente.

Asimismo si no se inicia con la mejora gradual del manejo de residuos peligrosos y la propuesta de nuevos proyectos de esta naturaleza, se enfrentarán limitaciones de espacio a futuro para el confinamiento de los mismos.

Es necesario realizar estudios de factibilidad para llevar a cabo un proyecto, debido a que de esta manera se determinará si es viable o no la ejecución del mismo y en gran medida su éxito, en todo caso identificar y realizar los cambios pertinentes para lograrlo. El no realizar este tipo de estudios aumenta el riesgo de fracaso de un proyecto.

1.2 Justificación

Los problemas asociados con los residuos peligrosos han dado paso al establecimiento de regulaciones con el fin de reducir su generación, así como dar un tratamiento y disposición final adecuados a este tipo de residuos.

Las regulaciones han contribuido a promover la innovación de tecnologías tanto de los procesos de producción para disminuir la generación de residuos peligrosos desde la fuente como tecnologías para reciclaje, reúso, tratamiento o eliminación de los mismos. En gran medida el manejo adecuado de los residuos peligrosos depende de que se identifiquen y entiendan los riesgos que se buscan prevenir o controlar.

Está demostrado que la incineración de residuos peligrosos como método de valorización energética es viable si se lleva a cabo bajo las condiciones de operación y mantenimiento adecuadas debido a que es una tecnología probada que presenta varios beneficios, siendo el principal la reducción del volumen, el aprovechamiento en forma de calor derivado de los gases de combustión para la generación de vapor o electricidad además del manejo controlado de emisiones hacia la atmósfera, minimizando los riesgos a la población y medio ambiente. Es así que en la Unión Europea este tipo de instalaciones son consideradas como negocios y fuentes de ingreso y empleos, así como cadenas productivas.

Tomando como base un sistema piloto de incineración de RP se busca llevar a cabo el escalamiento de la capacidad de residuos a tratar, mediante adecuaciones al mismo con el fin de encontrar mejoras al proceso para obtener un mayor aprovechamiento de los gases de combustión. Para llevar a cabo un proyecto de esta naturaleza es necesario conocer y realizar estudios de factibilidad con el fin de lograr una adecuada planeación del sistema de incineración y determinar la rentabilidad del proyecto.

1.3 Objetivo general

- Evaluar la factibilidad a nivel perfil de un proyecto de incineración de residuos sólidos peligrosos a partir del escalamiento de una planta piloto mediante una simulación computacional en donde se estudian las condiciones de operación del sistema.

1.4 Objetivos particulares

- Identificar áreas de oportunidad del sistema piloto de incineración de RP para su implementación en el escalamiento de la planta propuesta.
- Determinar la viabilidad técnica y ambiental del proyecto, identificando los criterios principales implicados durante el proceso de incineración de RP, realizando una comparación de los mismos con los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de incineración propuesto.
- Determinar la viabilidad económica del proyecto mediante la estimación de los costos de inversión (Clase IV) y el análisis de parámetros de rentabilidad del proyecto.

2. ANTECEDENTES

En el siguiente capítulo se definen los fundamentos teóricos a utilizar para llevar a cabo el estudio de factibilidad a nivel perfil. Comprendiendo la evaluación de proyectos, el diagnóstico de la situación actual de los residuos peligrosos y conceptos de incineración como método de tratamiento térmico para los mismos.

2.1 Evaluación de proyectos

La evaluación de proyectos surge de la necesidad de implementar un método que permita cuantificar las ventajas y desventajas que implica asignar recursos a una determinada iniciativa, definiendo la evaluación de proyectos como la planificación, el seguimiento y el control de todos los aspectos de un proyecto, con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto dentro de los criterios acordados de tiempo, costo y rendimiento. Los proyectos pasan a través de un ciclo de vida que varía con el tamaño y la complejidad del proyecto. En la Figura 1 se observa de manera general el ciclo de vida de los proyectos.

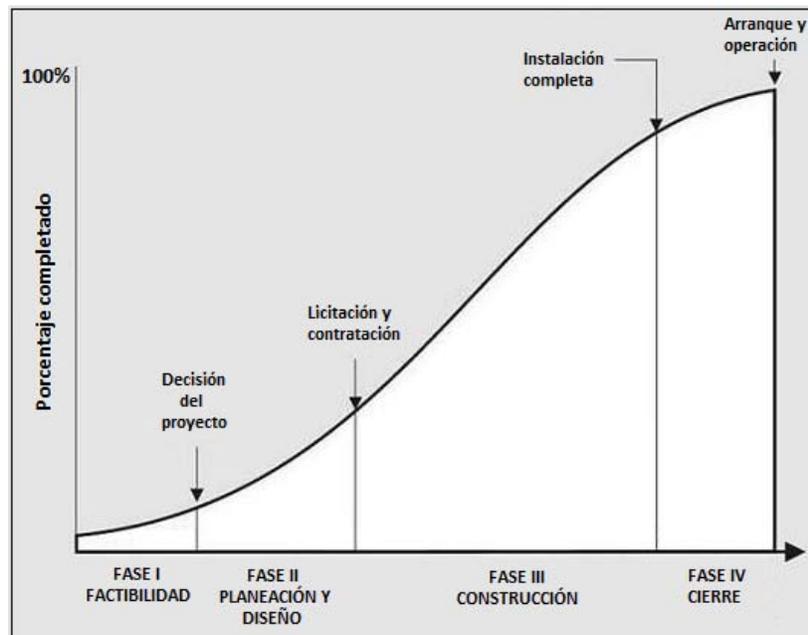


Figura 1. Ciclo de vida de un proyecto.

Fuente: (PMI Standards Committee, 1996)

2.1.1 Estudios de factibilidad

Este apartado se realizó mediante la consulta de los “Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión” de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP, 2013).

Los proyectos de inversión a los que se les evalúa la factibilidad tienen como objetivo la formación de capital para la solución de un problema específico, la atención de una necesidad o el aprovechamiento de una oportunidad. Éste implica la utilización de recursos (costos) para el logro de resultados (beneficios) en un determinado periodo de tiempo (vida útil del proyecto) (Secretaría de Finanzas, 2013). Estos son analizados con el objetivo de obtener la información necesaria para la toma de decisiones de inversión, para ello es necesario definir la rentabilidad del proyecto.

En la etapa de preinversión de los proyectos se realizan evaluaciones a distintos niveles de profundidad dependiendo de la información disponible con que se cuenta, lo que permite incrementar la certidumbre antes de tomar una decisión de inversión. Se puede evaluar la rentabilidad de un proyecto en al menos dos niveles.

Evaluación a nivel de perfil: Evaluación de un programa o proyecto de inversión en la que se utiliza la información disponible con que cuenta la dependencia o entidad, tomando en cuenta la experiencia derivada de proyectos realizados y el criterio profesional de los evaluadores. También se puede utilizar información proveniente de revistas especializadas, libros en la materia, artículos contenidos en revistas arbitradas, estudios similares, estadísticas e información histórica y paramétrica, así como experiencias de otros países y gobiernos.

Evaluación a nivel de prefactibilidad: Evaluación de un programa o proyecto de inversión en la que se utiliza, además de los elementos considerados en la

evaluación a nivel de perfil, información de estudios técnicos, cotizaciones y encuestas, elaborados especialmente para llevar a cabo la evaluación de dicho programa o proyecto. La información utilizada para este tipo de evaluación debe ser más detallada y precisa, especialmente por lo que se refiere a la cuantificación y valoración de los costos y beneficios.

Para realizar un estudio de factibilidad es necesario realizar el análisis de la situación actual o estudio de mercado que incluya una descripción clara de la oferta y demanda de los bienes y servicios relacionados con la finalidad de justificar la puesta en marcha de un programa de producción.

Entendiendo la oferta como la cantidad de producción, suministro y/o cantidad disponible de bienes o servicios por unidad de tiempo y la demanda como la cantidad de un determinado bien o servicio que la sociedad, un grupo o población determinada requiere o está dispuesta a consumir o utilizar por unidad de tiempo a un valor determinado.

En la interacción de la oferta y demanda se analiza si existe un déficit o superávit del bien o servicio y las consecuencias correspondientes. En caso de la optimización de un proyecto, la oferta toma en cuenta las optimizaciones que pueden llevarse a cabo para mejorar la provisión del bien o servicio y así disminuir los efectos del problema.

A su vez el estudio de factibilidad se subdivide en la evaluación de cuatro categorías principales: a) evaluación técnica, b) económica, c) ambiental y d) social. A la aprobación de cada una de ellas se le llama viabilidad; estas viabilidades se deben dar al mismo tiempo para alcanzar la factibilidad de un proyecto.

Evaluación técnica: los estudios sobre los materiales, maquinaria, equipo, tecnología y calificación de personal que se requieren para la ejecución y operación de un programa o proyecto de inversión, en donde se determine si el proyecto se

apega a las normas correspondientes, así como a las prácticas aceptadas de ingeniería y a los desarrollos tecnológicos disponibles.

Evaluación económica: los estudios sobre la cuantificación de los costos y beneficios de un programa o proyecto de inversión en donde se muestre que el mismo es susceptible de generar, por sí mismo, beneficios netos bajo supuestos razonables.

Evaluación ambiental: los estudios en donde se determina que un programa o proyecto de inversión cumple con la normatividad aplicable en materia ambiental.

Evaluación social: el estudio del programa o proyecto con el objeto de conocer el efecto neto de los recursos utilizados en la producción de los bienes o servicios sobre el bienestar de la sociedad.

2.1.2 Parámetros para determinar la rentabilidad de un proyecto

Antes de llevar a cabo un proyecto es indispensable determinar si este es económicamente viable, mediante la cuantificación de los costos y beneficios de un programa o proyecto de inversión. Los indicadores de rendimiento se definen por el incremento o disminución del bienestar que se derivaría del uso de recursos en alguna actividad específica, los principales parámetros para medir la rentabilidad son el Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno y Periodo de Recuperación de la Inversión (FIRA, 2011).

2.1.2.1 VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial, por lo que es un criterio permite conocer el balance de los costos y beneficios a lo largo del horizonte de evaluación, es decir, permite saber si los

beneficios serán mayores a los costos. Para obtener el VPN se utiliza la Ecuación (1) (SHCP, 2013).

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t}$$

Ecuación (1)

Donde:

B_t = Beneficios totales en el año t

C_t = Costos totales en el año t

$B_t - C_t$ = Flujo neto en el año t

n = Número de años del horizonte de evaluación

r = Tasa social de descuento

t = Año (0, 1, 2, ..., n) en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones

En el cálculo del valor presente neto se selecciona un periodo de tiempo arbitrario, lo cual es un método muy utilizado por las empresas debido a que refleja adecuadamente el valor del flujo de efectivo y sus efectos sobre la rentabilidad.

De esta manera si el valor de VPN es mayor a cero es conveniente aceptar la inversión, ya que se estaría ganando más del rendimiento solicitado, caso contrario, si el valor de VPN es menor a cero se debe rechazar la inversión debido a que no se estaría ganando el rendimiento mínimo solicitado (Baca Urbina, Fundamentos de Ingeniería Económica, 2007).

2.1.2.2 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad (TIR) de una inversión está definida como la tasa de interés con la cual el valor presente neto (VPN) es igual a cero. Es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial, donde los valores son calculados a partir del flujo de caja anual, trayendo todas las cantidades futuras, flujos negativos y positivos al presente mediante la Ecuación (2) (SHCP, 2013).

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + TIR)^t}$$

Ecuación (2)

Donde:

B_t = Beneficios totales en el año t

C_t = Costos totales en el año t

$B_t - C_t$ = Flujo neto en el año t

n = Número de años del horizonte de evaluación

TIR = Tasa Interna de Retorno

t = Año (0, 1, 2, ..., n) en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones

La TIR es un indicador de rentabilidad utilizada para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión, en donde se compara con una tasa mínima o tasa de corte, la cual será el costo de oportunidad de la inversión.

Si la tasa de rendimiento del proyecto expresada por la TIR supera la tasa de corte, la inversión es aceptada, en caso contrario se rechaza (Baca Urbina, Fundamentos de Ingeniería Económica, 2007).

2.1.2.3 PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (PRI)

Es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial.

Se presenta como desventaja el hecho de no considerar todos los flujos netos de efectivo del proyecto, debido a que ignora aquellos que se producen con posteridad al plazo de recuperación de la inversión.

2.1.2.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Mediante el análisis de sensibilidad, es posible identificar las variaciones máximas permisibles de las magnitudes de factores que generalmente son la inversión inicial, los flujos de caja o bien la tasa de interés. Los cambios en los factores pueden modificar los resultados de decisión.

Con el manejo de la sensibilidad, es posible establecer los intervalos de comportamiento aceptables para que un proyecto continúe siendo rentable.

También se puede aplicar el análisis de sensibilidad para identificar las variables que tienen un mayor efecto sobre los resultados de la evaluación, esto en muchas ocasiones propicia el que se lleven a cabo estudios en mayor detalle, con lo que se mejora la estimación de dichas variables y se reduce el riesgo propiciado por errores en el cálculo de los mismos; además, de dar pauta para establecer un mayor control y seguimiento del comportamiento de las variables a lo largo de la vida útil del proyecto (Sainz & Magaña, 2007).

2.2 Diagnóstico de la situación actual de los residuos peligrosos

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define a un residuo como el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (LGPGIR, 2014).

Los residuos peligrosos se definen como aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad (CRETIB), así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio (LGPGIR, 2014).

La descripción de las características que definen a un residuo como peligroso de acuerdo a esta Ley se muestra en el Anexo 8.1 (SEMARNAT, 2006).

2.2.1 Generación de residuos peligrosos

Los primeros estudios para estimar el volumen de residuos peligrosos generados en el país fueron elaborados en 1994 por el Instituto de Ecología (INE), a partir de entonces, las cifras han sido diversas y se ha basado fundamentalmente en la información reportada por las empresas que generan o tratan este tipo de residuos. La aproximación más reciente sobre el volumen de generación de RP para el país se obtiene a partir de los registros que hacen las empresas incorporadas al Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos (PGRP) a la SEMARNAT, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Estimaciones de la generación de RP en México

Año	Generación estimada (millones de toneladas)	Base de la información	
1996 ^a	2.1	3,000	empresas
1999 ^a	3.2	12,514	empresas
2000 ^a	3.7	27,280	empresas
2004 ^a	6.2	35,304	empresas
2004-2009	1.70	52,784	empresas
2004-2011 ^b	1.92	68,733	empresas
2004-2013 ^b	2.03	84,279	empresas

Fuentes:

^a (SEMARNAT, 2005)^b (SEMARNAT, 2014)

Las grandes diferencias entre estimaciones reportadas en los últimos años se deben principalmente a: 1) el número de empresas utilizadas para calcular el volumen generado; 2) la depuración del padrón y revisión de los reportes de generación de residuos, los cuales permitieron eliminar duplicidades y errores de estimación por parte de las empresas; 3) la modificación de la NOM-052-SEMARNAT-1993, actualmente NOM-052-SEMARNAT-2005, que se establece las características de los residuos para ser considerados como peligrosos y de donde se eliminaron los jales mineros y los recortes de perforación de la industria petrolera, los cuales constituían una fracción importante del total de RP reportados.

De acuerdo a la clasificación de generadores de residuos peligrosos se encuentran todas aquellas personas físicas o morales, establecimientos industriales, comerciales o de servicio que generen RP, los cuales se dividen en tres categorías. *Microgeneradores*: referido hasta cuatrocientos kilogramos de residuos al año o su equivalente en otra unidad de medida con 56% del total de los generadores pero con un volumen total reportado de apenas el 0.6%.

Pequeño generador: con una cantidad igual o mayor a cuatrocientos kilogramos y menor a diez toneladas en peso bruto total de residuos al año o su equivalente en otra unidad de medida con 36% de las empresas representando el 3.7% del volumen total.

Gran generador: aquel que genere una cantidad igual o superior a diez toneladas en peso bruto total de residuos al año o su equivalente en otra unidad de medida con solo el 8% del total de los generadores con un equivalente al 95.7% del volumen total generado (LGPGIR, 2014).

La información contenida en dicho registro nos muestra que para el periodo 2004-2013 las 84,279 empresas registradas generaron 2.03 millones de toneladas (SEMARNAT, 2014). Sin embargo esta cifra no debe considerarse como el volumen total de RP generados en el país en ese periodo, debido a que el PGRP no incluye a la totalidad de las empresas que producen estos residuos en el territorio.

La Tabla 2 muestra el total de la generación de residuos peligrosos estimada abarcando las tres categorías de generadores en el país por entidad federativa de acuerdo al número de empresas registradas, en donde se observa que la Zona Metropolitana del Valle de México reporta el mayor volumen de generación de RP con un 29%, seguida por entidades como Chihuahua 17%, Campeche 10% y Tamaulipas con 7% del volumen total generado. En contraste los estados que reportaron menores volúmenes de RP son Chiapas, Tlaxcala, Baja California Sur y Nayarit que en conjunto aportaron el 0.3% del total nacional (SEMARNAT, 2014).

Tabla 2. Generación estimada de RP por entidad federativa de acuerdo al número de empresas registradas en el Padrón de Generadores, 2004-2013

Entidad federativa	Número de empresas	Generación estimada (Toneladas)
Aguascalientes	1,340	51,141.30
Baja California	5,346	29,697.02
Baja California Sur	1,405	1,611.68
Campeche	816	211,858.76
Chiapas	2,488	2,233.56
Chihuahua	4,088	345,761.34
Coahuila	1,560	86,013.69
Colima	1,300	4,752.36
Durango	1,462	4,995.02
Estado de México	4,464	42,747.05
Guanajuato	2,779	66,611.16
Guerrero	1,740	3,369.73
Hidalgo	1,782	24,245.96
Jalisco	8,242	68,461.31
Michoacán	4,119	10,936.92
Morelos	1,737	5,329.01
Nayarit	654	1,383.47
Nuevo León	2,960	135,282.57
Oaxaca	1,427	2,632.69
Puebla	2,474	16,591.97
Querétaro	2,133	12,637.72
Quintana Roo	800	6,754.96
San Luis Potosí	1,746	20,594.78
Sinaloa	2,344	8,232.21
Sonora	1,884	18,325.62
Tabasco	1,448	65,552.72
Tamaulipas	2,054	150,299.66
Tlaxcala	545	2,321.27
Veracruz	3,461	29,347.36
Yucatán	1,780	4,478.85
Zacatecas	861	7,833.21
ZMCM	13,040	593,033.90
Total	84,279	2,035,069

Fuente: (SEMARNAT, 2014)

Los principales tipos de industrias que generaron volúmenes mayores de residuos peligrosos en el periodo entre 2004-2013 fueron la química con el 10.5% total de RP, metalúrgica 9.7%, automotriz 8.9%, servicios mercantiles 5.8% y la de equipos y artículos electrónicos con 4.4%. A su vez, las mayores fracciones de generación correspondieron a los residuos sólidos, los cuales incluyen residuos de mantenimiento automotriz, asbesto, telas, pieles y metales pesados, entre otros aportando el 44.9% del total generado, seguidos por los aceites gastados 20.8%, lodos 8%, biológico-infecciosos 7.2% y solventes 3.3%. Los RP que menos se generaron fueron las breas con 0.03% del total generado, las sustancias corrosivas 1% y las escorias con el 1.5% mostrados en la Figura 2.

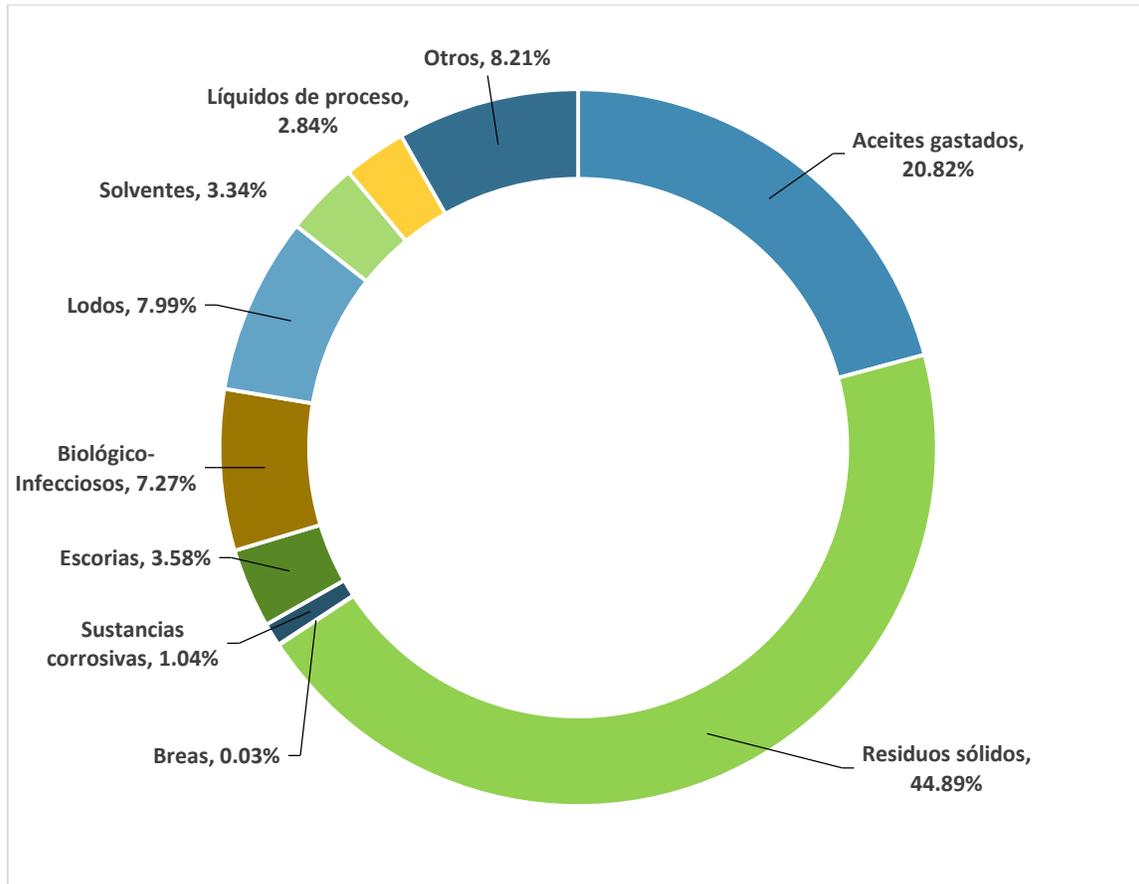


Figura 2. Generación de RP reportada por tipo de residuo.

Fuente: (SEMARNAT, 2014)

2.2.2 Manejo integral de residuos peligrosos

Los residuos peligrosos pueden disponerse de distintas formas, este manejo se refiere a las actividades de reducción en la fuente, por el reciclaje y reuso previo a su tratamiento y disposición final, por medio del tratamiento que reduce su peligrosidad, por su incineración bajo condiciones controladas, y por su confinamiento en sitios adecuados para ello, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.

En materia de gestión de residuos, el primer objetivo es evitar la generación; si esta no es posible de evitar, se debe procurar su minimización; si esto no es posible, entonces se debe evaluar su potencial disposición final. Esta secuencia para la gestión de residuos se denomina jerarquía y se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Estrategia Jerarquizada de residuos

Fuente: Adaptado de (Ministerio del Medio Ambiente, 2011)

La jerarquía considera las siguientes etapas:

Prevenición: acciones o medidas destinadas a evitar o reducir la generación de residuos, disminuir la presencia de sustancias peligrosas o contaminantes en ellos, minimizar los impactos significativos sobre el medio ambiente o la salud de las personas que éstos generen.

Reutilización: acción consistente en el uso de un material o producto previamente utilizado como insumo en el proceso productivo que le dio origen.

Reciclaje: acciones de valorización mediante las cuales los residuos son transformados en nuevos productos, excluyendo la valorización energética.

Valorización energética: empleo de un residuo como combustible en un proceso productivo.

Disposición: La Ley General de Ecología y Protección al Ambiente (LGEEPA) define la disposición final como la acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al medio ambiente.

Comunicaciones y transporte: Entre la recolección de los RP y su tratamiento o disposición final puede requerirse el llamado almacenamiento temporal o acopio de residuos, en el cual permanecen almacenados un tiempo en espera de ser llevados a su siguiente fase de manejo, conforme a los tiempos que marca la LGPGIR.

Actualmente, con el objetivo de reducir los riesgos ambientales y a la salud, se está dando mayor énfasis a la prevención de la generación de residuos peligrosos, observando las restricciones cada vez mayores para su disposición final.

Se entiende como tratamiento a aquellos procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales cambian las características de los residuos (LGPGIR, 2014), algunos promueven la destrucción de los productos indeseables, otros alteran sus características de peligrosidad de modo que su disposición final al medio ambiente se torne más aceptable, o simplemente segregan la masa de los constituyentes indeseables para favorecer el reciclaje y reducir su volumen final.

Existe una amplia gama de operaciones para el tratamiento de los residuos peligrosos, a continuación se mencionan los tratamientos más utilizados agrupados por bloques de acuerdo a las características de cada proceso (Rodríguez Jiménez, 1999).

2.2.2.1 Tratamientos físicos

Los procesos físicos de tratamiento se utilizan principalmente en el acondicionamiento de los residuos, estas operaciones se integran en un tren de tratamiento que puede también combinarse con algunos procesos de transformación química o biológica.

La aplicación de las operaciones unitarias para el tratamiento físico de residuos peligrosos incluye principalmente procesos de separación aplicables a residuos con un alto contenido en fase líquida.

Entre las operaciones de tratamiento físico más utilizadas se encuentran (Rodríguez Jiménez, 1999).

- Sedimentación/espesamiento
- Centrifugación
- Filtración
- Flotación
- Arrastre con aire o vapor de agua
- Procesos a base de membranas: ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis.

2.2.2.2 Tratamientos químicos

La aplicación de los procesos químicos al tratamiento de residuos peligrosos tiene como objetivo general la transformación de dichos residuos, o de alguno de sus componentes, en especies de menor peligrosidad o inertes mediante la utilización de una reacción química (Rodríguez Jiménez, 1999).

En general los tratamientos químicos suelen ir acompañados de operaciones físicas, en las que tienen lugar la separación de fases o componentes de los residuos, también llamados en conjunto tratamientos fisicoquímicos, los cuales sirven de acondicionamiento para permitir un tratamiento posterior (Rodríguez Jiménez, 1999).

Los tratamientos fisicoquímicos más utilizados son.

- Solidificación/estabilización
- Floculación
- Absorción
- Adsorción
- Intercambio iónico
- Extracción

Así como los métodos de tratamiento químico.

- Oxidación
- Reducción
- Neutralización
- Precipitación
- Descloración

2.2.2.3 Tratamientos biológicos

La degradación biológica de sustancias orgánicas peligrosas es un enfoque viable para la administración de residuos. Los procesos comúnmente más utilizados son procesos a base de bacterias aerobias o anaerobias que tienen la finalidad de acelerar la degradación de los residuos.

Los residuos orgánicos peligrosos pueden ser tratados mediante procesos biológicos debido a que los químicos orgánicos pueden ser degradados con el establecimiento, mantenimiento y control de las adecuadas comunidades microbianas.

2.2.2.4 Métodos térmicos

Se considera como tratamiento térmico de los residuos cualquier proceso destinado a la transformación de los residuos mediante la aplicación de energía calorífica, estos tratamientos no se consideran como finales pues generan residuos que deben de gestionarse correctamente.

Estas tecnologías se dividen en diferentes categorías, principalmente debido al tipo de gases oxidantes alimentados, o su ausencia, y la proporción en que se alimentan respecto a la cantidad de residuos alimentados. La alimentación de estos gases influye en el grado de oxidación de los productos. Otras diferencias en los tipos de tecnologías son la alimentación de fluidos, comúnmente llamados aditivos, u otras sustancias adicionales al proceso, además de la temperatura empleada en el proceso y el tipo de reactor u horno empleado.

En su totalidad las tecnologías de conversión térmica con recuperación de energía deben contar con un sistema de tratamiento de gases, debido a que en alguna etapa del proceso ya sea en el reactor principal o en una sección posterior, gases de combustión son producidos para liberar energía aprovechable, los cuales deben cumplir con cierta normatividad para ser liberados como emisiones atmosféricas.

Gasificación: Es un proceso exotérmico en donde su alimentación es oxidada parcialmente, alimentando una cantidad de oxígeno subestequiométrica. En este tipo de sistemas se tiene un control detallado de las variables de proceso como la alimentación de gases oxidantes (aire, oxígeno), además de aditivos, la temperatura y presión de operación (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Gasificación por arco de plasma: Existen ciertos reactores que trabajan a altas temperaturas y que garantizan la desintegración total de compuestos presentes en los residuos tratados. A diferencia de la gasificación convencional en donde el calor se suministra mediante combustión, el calor es suministrado mediante antorchas de

plasma; y puede utilizarse como proceso único o en conjunto con un reactor de gasificación u otro proceso de conversión térmica de residuos (Klinghoffer & Castaldi, 2013).

Pirólisis: Es un proceso extensivamente endotérmico donde los residuos se desintegran en sustancias más simples, productos sólidos, líquidos y gaseosos. El gas obtenido tiene como componentes: CH₄, CO, y CO₂; y se encuentra en una proporción definida por las condiciones de temperatura, presión, y contenido de oxígeno. Los productos líquidos son aceites o tar (alquitrán); y los materiales sólidos son denominados char (escorias) (Arena, 2012).

Incineración: Las tecnologías de incineración o combustión son aquellas en donde se provoca una oxidación de los componentes presentes en los residuos mediante reacciones de combustión, las reacciones de combustión a su vez liberan energía en forma de calor. La práctica más común es alimentar oxígeno en exceso contenido en una corriente de aire (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

En la Tabla 3 se mencionan las ventajas y desventajas del uso de tratamientos térmicos.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del uso de tratamientos térmicos

Ventajas	Desventajas
Permite una reducción del 80 al 90% del volumen original de los residuos, sobre todo cuando los residuos contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos.	Se requiere que el equipo opere con gran eficiencia para evitar la formación de dioxinas y furanos.
Flexibilidad de operación aplicable a residuos sólidos, líquidos y lodos.	Un alto contenido de humedad puede afectar los requerimientos de energía.
Puede alcanzar alta eficiencia de remoción de compuestos orgánicos y volátiles, hasta de 99.99%	Se requiere de la disposición final de las cenizas.
Propicia el reciclaje energético, ya que se utilizan los residuos como combustible alternativo.	Se requiere de equipo de control de emisiones contaminantes a la atmósfera.
Posibilidad de recuperación de energía en forma de calor.	Altos costos de inversión.
Los equipos de incineración requieren poco espacio.	Limitada aceptación social.

Fuente: (Cortinas & Mosler, 2002)

2.2.3 Normatividad

El manejo y disposición final de los residuos peligrosos conlleva la responsabilidad de quien los genera, por lo que se debe asegurar, en caso de la contratación de alguna empresa especializada, que cuente con los registros y autorizaciones vigentes ante la SEMARNAT para en el manejo y disposición final de los residuos, de lo contrario el generador será el responsable de los daños ocasionados por su manejo.

Existe normatividad aplicable para el tratamiento térmico de residuos peligrosos, ya sea para emisiones de gases de combustión o para disposición de subproductos, así como para prestar el servicio a terceros para el manejo de residuos peligrosos mediante su incineración. Las principales normas y trámites que se deben de considerar en los procesos de valorización energética son las siguientes.

NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos.

Esta Norma Oficial Mexicana establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales.

NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes; en la cual se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes contenidos en los gases a ser liberados a la atmósfera.

El diseño, equipamiento y funcionamiento de las instalaciones de incineración deben permitir que la temperatura de los gases derivados de la incineración de los residuos se eleve, tras la última inyección de aire de combustión, de manera controlada y homogénea, aun en las condiciones más desfavorables, hasta por lo menos 850°C, alcanzados en o cerca de la pared interna, de la cámara de

combustión final, durante un tiempo mínimo de por lo menos dos segundos. En el caso de que se incineren residuos peligrosos que contengan más del 1% de sustancias organocloradas expresadas en cloro, la temperatura deberá elevarse hasta 1,100°C, y durante 2 segundos como mínimo.

En la Tabla 4 se muestran los límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos, así como la frecuencia de medición de los mismos.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos

Contaminante	Unidades	Límite de emisión	Frecuencia de medición
CO	mg/m ³	63	Continuo
HCl	mg/m ³	15	Trimestral
NOx	mg/m ³	300	Semestral
SO2	mg/m ³	80	Semestral
Partículas	mg/m ³	50	Semestral
Arsénico, Selenio, Cobalto, Níquel, Manganeso y Estaño	mg/m ³	0.7*	Semestral
Cadmio	mg/m ³	0.07	Semestral
Plomo, Cromo total, Cobre y Zinc	mg/m ³	0.7*	Semestral
Mercurio	mg/m ³	0.07	Semestral
Dioxinas y furanos EQT. Instalaciones de incineración nuevas.	ng/m ³	0.2	Anual
Dioxinas y furanos EQT. Instalaciones de incineración existentes.	ng/m ³	0.05	Anual

Todos los valores están referidos a condiciones estándar: 1 atmósfera, base seca, 25°C y 7% de Oxígeno O₂, de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994.

* Suma total metales pesados.

Fuente: NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

NOM-085-SEMARNAT-2011. Contaminación atmosférica-niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición. En esta se establecen los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire.

NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002- SEMARNAT-1996 o NOM-003-SEMARNAT-1997. La corriente a descarga proveniente del tratamiento de gases debe cumplir con la calidad de descarga especificada en la normatividad mexicana de acuerdo a su cuerpo o sistema de descarga o reuso.

SEMARNAT 07-033-F. Trámite de autorización para el manejo de residuos peligrosos para su incineración, en donde el proceso de incineración aplicará para aquellos residuos no susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos.

SEMARNAT-07-017. Trámite mediante el cual aquellos que generen residuos peligrosos a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo cumplan con el registro ante la SEMARNAT. De esta forma se tiene conocimiento de quienes son los generadores, la cantidad de residuos generados y la categoría correspondiente.

Licencia Ambiental Única (LAU). Autorización basada en la regulación directa para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal en materia de atmósfera referida a toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Cédula de Operación Anual (COA). Es el instrumento de reporte y recopilación de información de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos peligrosos a nivel Federal, el donde los obligados deben presentar la COA en el primer cuatrimestre de cada año, reportando los resultados del muestreo ambiental representativo del año anterior, realizado por laboratorios autorizados.

2.2.3.1 INCINERADORES AUTORIZADOS POR SEMARNAT

De acuerdo a la SEMARNAT se reporta un total de cincuenta y cinco incineradores autorizados en México, de los cuales diez corresponden a la incineración de RP, trece a la incineración de RPBI y treinta y dos instalaciones de la industria cementera para el coprocesamiento. En la Figura 4 se menciona el porcentaje que ocupan los distintos tipos de incineradores de RP conforme al total instalado. Asimismo en el Anexo 8.2 se muestra la distribución por entidad federativa de incineradores de residuos peligrosos registrados ante la SEMARNAT dentro del territorio mexicano.

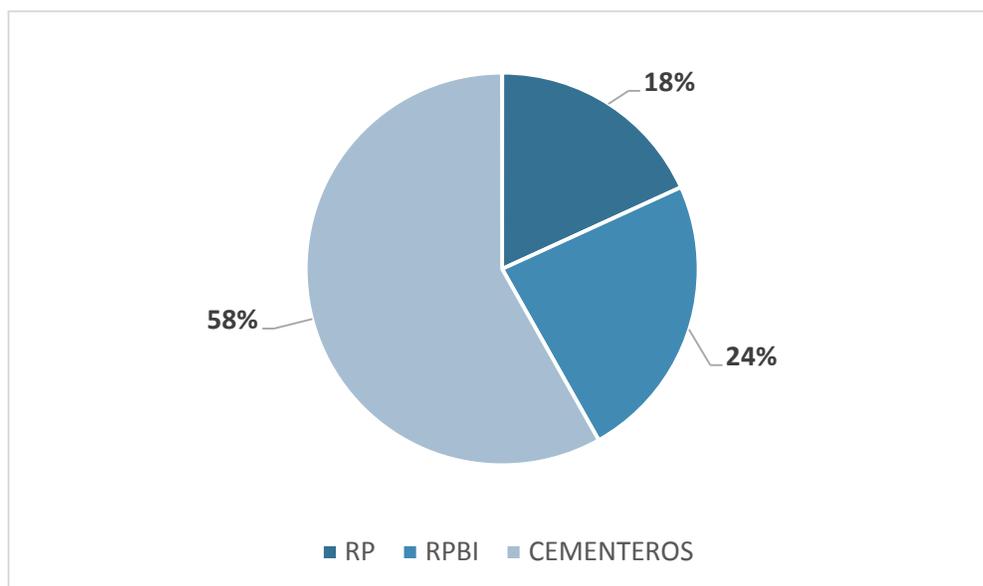


Figura 4. Porcentaje de distribución de incineradores de RP en México.

Fuente: Elaboración propia

2.3 Incineración

El proceso de incineración de residuos opera generalmente con temperaturas que van desde los 850 °C a los 1200 °C (Arena, 2012), aunque también hay procesos de incineración que operan por encima de este intervalo. La combustión se realiza en exceso de oxígeno y tiene como principal producto aprovechable la generación de energía calorífica que puede ser utilizada para generar vapor y con él, electricidad o para impulsar procesos de calefacción o calentamiento; gran parte de esta energía se transmite mediante la corriente de gases de combustión producidos y que tienen una elevada temperatura.

Mediante ciertos procesos de alimentación a los sistemas térmicos de valorización pueden modificarse ciertas características de los mismos. Algunos procesos requieren que su alimentación cumpla con ciertos estándares mínimos. Al total de estos procesos se le llama pre-tratamiento. Mediante estos procesos de pre-tratamiento se remueven fracciones no susceptibles a combustionar tales como vidrio, metales y materiales voluminosos; también se reduce de tamaño a cierto diámetro dependiendo el proceso; otro factor adicional que puede ser manipulado es la humedad que puede ser disminuida mediante diferentes métodos de secado. En general la incineración de residuos se aplica a aquellos que poseen un poder calorífico medio y alto, que tengan un contenido de compuestos orgánicos mayor al 30%, un contenido de compuestos inorgánicos menor al 15% (cenizas) y que no contengan más del 65% de agua. Los residuos susceptibles a incinerar incluyen textiles, plásticos, madera, papel y cartón los cuales están impregnados de hidrocarburos, solventes, aceites, pinturas y otras sustancias consideradas como residuos peligrosos.

Las tecnologías comúnmente utilizados para la incineración de residuos son hornos de parrilla móvil (Figura 5), hornos de lecho fluidizado (Figura 6) y hornos rotatorios (Figura 7), de los cuales se hará una descripción más detallada a continuación.



Figura 5. Esquema de horno de parrilla móvil
Fuente: (MARTIN GmbH, 2012)

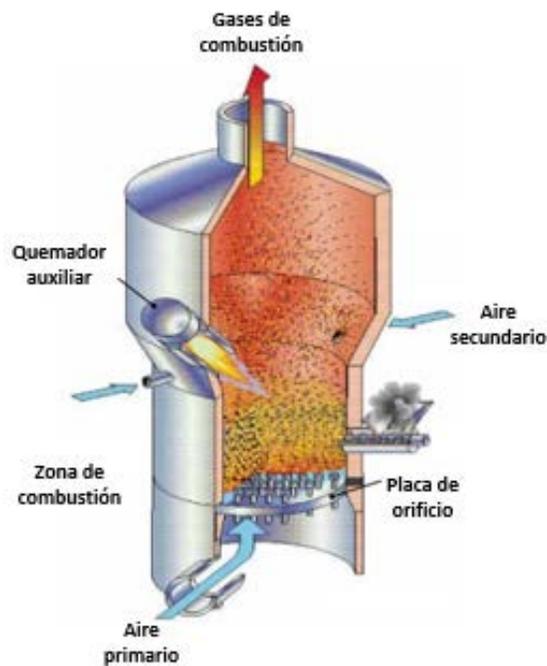


Figura 6. Esquema de horno de lecho fluidizado
Fuente: (Hitachi Zosen Inova AG, 2014)

2.3.1 Horno rotatorio

La tecnología de horno rotatorio consiste en una cámara cilíndrica recubierta en su interior con material refractario, el cilindro está acomodado horizontalmente con cierta inclinación y está equipado con un sistema de rotación (0.3 – 1.5 r/min). Debido a la inclinación y rotación, los residuos son transportados y volteados a lo largo de la cámara, lo que provoca una mezcla entre la materia prima y el aire primario que fluye a lo largo del eje del horno incrementando la eficiencia térmica del sistema. Los hornos rotatorios son cerrados, lo que implica que también pueden ser alimentados con residuos líquidos y viscosos. En la Figura 7 se muestra el esquema de un horno rotatorio.

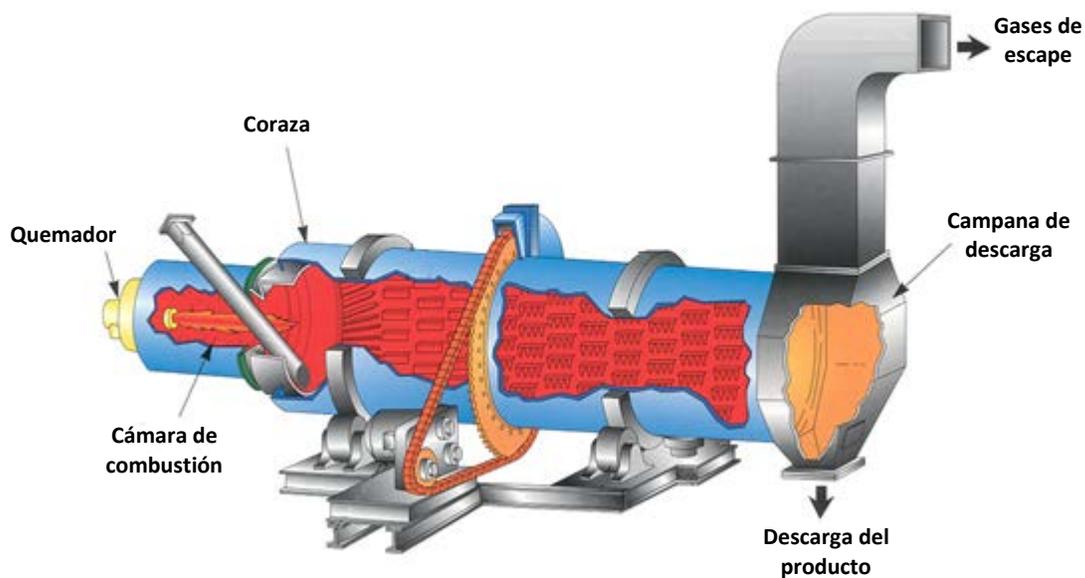


Figura 7. Esquema de horno rotatorio

Fuente: (FEECO International, 2014)

Los gases de combustión del horno pasan a una cámara de combustión secundaria, separada del tambor rotatorio donde se introduce el aire secundario que la completa calentándose hasta una temperatura alta para completar su destrucción, mientras que las cenizas se vierten al extremo final.

La cámara de combustión secundaria es necesaria prácticamente en todas las incineradoras de residuos peligrosos en donde se queman residuos sólidos debido a que la cámara de combustión primaria no proporciona suficiente tiempo, turbulencia o temperatura para destruir los componentes orgánicos del residuo.

La función de la cámara de combustión primaria es volatilizar la fracción orgánica del residuo mientras que en la cámara de postcombustión o cámara de combustión secundaria se calientan los componentes orgánicos vaporizados hasta una temperatura donde se oxidan completamente, este proceso ocurre a una temperatura de 850 a 1200°C con un tiempo de retención del gas de combustión de 2 segundos (Rodríguez Jiménez, 1999).

La incineración constituye el sistema más utilizado en el campo de los RP dentro del grupo de procesos de tratamiento térmico la cual engloba un conjunto de técnicas para la eliminación del carácter peligroso del residuo tratado mediante el empleo de temperaturas suficientemente altas.

La incineración de RP exige una consideración especial a los gases resultantes del proceso de combustión debido a que la limpieza de los mismos requiere la inclusión de los correspondientes dispositivos técnicos que representan una fracción importante de la inversión necesaria. Estos gases de combustión deben cumplir con cierta normatividad para ser liberados como emisiones atmosféricas y el sistema de tratamiento de gases tiene como fin cumplir con la calidad requerida.

2.3.2 Exceso de aire

La necesidad de conseguir la destrucción prácticamente completa de los contaminantes, particularmente de los catalogados como de atención prioritaria por su especial peligrosidad hace que la proporción de O₂ en la atmósfera del horno adquiera un carácter particularmente relevante desde un punto de vista operativo (Rodríguez Jiménez, 1999).

El exceso de aire presenta también una influencia sobre las condiciones de trabajo determinantes de la eficacia de la combustión, temperatura, tiempo de residencia de los gases y calidad de mezcla. Por una parte para una velocidad de alimentación del residuo dada, un mayor caudal de aire mejora el contacto entre el material combustible y el O_2 , lo que contribuye a aumentar la eficacia de combustión. Por el contrario, para un volumen dado de la cámara de combustión, un incremento del caudal de aire se traduce en una disminución del tiempo de residencia de los gases en la misma y consecuentemente del grado de destrucción de los compuestos combustibles que pasan a la fase gas por volatilización (Rodríguez Jiménez, 1999). En la Figura 8 se muestra la curva de aire de alimentación a un incinerador.

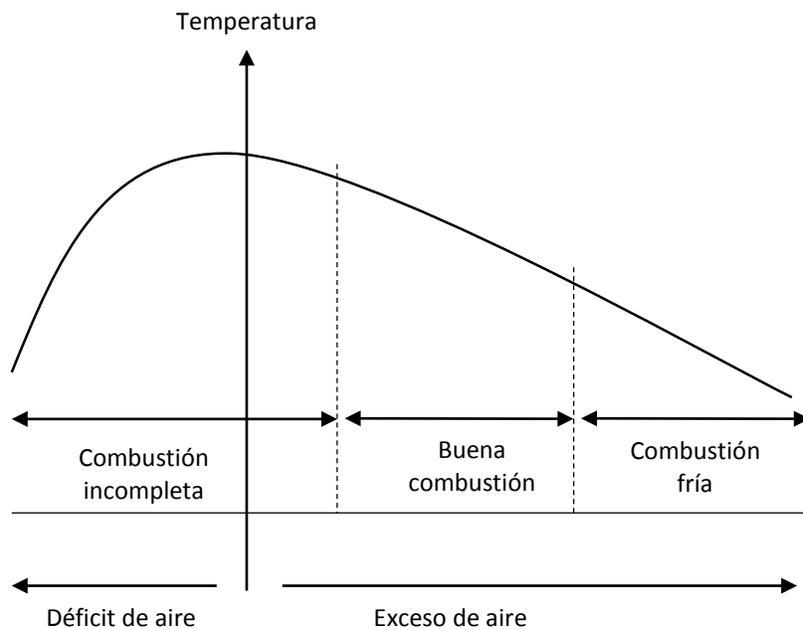


Figura 8. Curva de temperatura con aire en exceso

Fuente: (LaGrega, 2001)

El exceso de aire es también utilizado en los incineradores como control de la temperatura debido a que el aire absorbe calor generado durante las reacciones de combustión (LaGrega, 2001).

2.3.3 Combustibles

La norma mexicana NMX-AA-33-1985 define al poder calorífico como el calor de combustión de una sustancia. Cuando el poder calorífico de los residuos es elevado y por encima de otros combustibles, existe el interés en la utilización de los primeros para producir energía a través de su combustión. Una alternativa de aprovechamiento estos residuos puede ser el empleo de estos como combustible de sustitución, es decir, reemplazar a combustibles fósiles tradicionales en diferentes procesos. En la Tabla 5 se menciona el poder calorífico de varios materiales comúnmente encontrados en la incineración de residuos.

Tabla 5. Poder calorífico de diversos materiales

Residuo	Poder calorífico (Cuando se quema) Btu/lb	Contenido en peso	
		Cenizas %	Humedad %
Queroseno	18,900	0.5	0
Benceno	18,210	0.5	0
Tolueno	18,440	0.5	0
Hidrógeno	61,000	0	0
Alcohol metílico	10,250	0	0
Alcohol etílico	13,325	0	0
Naftaleno	15,000	0	0
Periódicos	7,975	1.5	6
Papel de embalaje	7,250	1.0	6
Revistas	5,250	22.5	5
Cajas de cartón (tetra-brik)	11,330	1.0	3.5
Cuero de zapatos	7,240	21.0	7.5
Suelas con compuestos de butilo	10,900	30.0	1
Polietileno	20,000	0	0
Poliuretano	13,000	0	0
Látex	10,000	0	0
Residuos de caucho	9,000-11,000	20-30	
Carbón	14,093	0	0
Parafina	18,621	0	0
Alquitrán o Asfalto	17,000	1	0
Serrín de madera	7,800-8,500	3	10
Corteza de madera	8,000-9,000	3	10
Tropos (seda o lana)	8,400-8,900	2	5
Tropos (lino o algodón)	7,200	2	5

Fuente: (LaGrega, 2001)

Los residuos orgánicos normalmente tienen el poder calorífico suficiente para soportar la combustión, por lo que el combustible fósil es utilizado como un sistema auxiliar para la ignición del residuo. Sin embargo cuando se trata de residuos peligrosos, el poder calorífico puede ser bajo por lo que el combustible será utilizado para llevar a los residuos a la temperatura en la cual pueda ocurrir una rápida oxidación de la fracción orgánica de los residuos (LaGrega, 2001).

Un método empírico para la aproximación del valor poder calorífico mediante la ecuación de Dulong (Ecuación (3)) la cual se muestra a continuación (Brunner, 1993).

$$Q = 14544 * C + 62028 * (H - 0.125 * O) + 4050 * S$$

Ecuación (3)

Donde:

Q está expresada en Btu/lb

C, H, O y S son la fracción masa del carbón, hidrógeno, oxígeno y azufre presente.

La fracción masa debe sumar 100% excepto si se encuentra un componente inerte como el nitrógeno, en este caso la suma de las fracciones deberá sumar 100% menos la fracción del nitrógeno presente.

Los combustibles comúnmente utilizados como sistemas auxiliares de calentamiento en la incineración son combustibles comerciales como gas natural, metano, propano (LPG), aceites ligeros o pesados o alguna mezcla de solvente gastado.

En la Tabla 6 se muestran algunas propiedades de los combustibles mayormente utilizados.

Tabla 6. Propiedades de combustibles convencionales

Combustible	Poder calorífico MJ/kg	Peso específico kg/L	Componentes principales (%)			FE _{SO2} g/kg
			S	N	Agua	
Gas natural	52	-	-	-	-	≈0
Gas L.P.	48+	0.504 ⁽²⁾ 0.580 ⁽²⁾	0.014 ⁽²⁾	-	-	≈0
Diésel Industrial	48	-	0.05 0.5 ⁽¹⁾	-	0.05 ⁽¹⁾	1
Gasóleo Doméstico	42	0.905 ⁽²⁾ 0.911 ⁽²⁾	0.05 ⁽¹⁾	-	0.5 ⁽²⁾	-
Combustóleo pesado	42	1.00 ⁽²⁾	4.0 ⁽¹⁾	Informar ⁽¹⁾	1.0 ⁽¹⁾	80
Combustóleo ligero	43	0.966 ⁽²⁾	2.0 4.0 ⁽¹⁾	-	1.0 ⁽¹⁾	40
Carbón mineral	Varía	-	-	-	-	-
Coque de petróleo	31	-	7.0 6.5 ⁽²⁾	-	15 ⁽²⁾	140

FE_{SO2}: Factor de emisión de SO₂ del combustible, g/kg.

(1) NOM-086

(2) Hoja Técnica de Especificaciones de Pemex-Refinación

Fuente: NOM-085-SEMARNAT-2011

2.3.4 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se sitúan normalmente entre 20 min y 1h para el residuo, la cámara de combustión secundaria se incorpora para conseguir los altos niveles de destrucción exigidos. Los gases procedentes del horno principal llegan a dicha cámara y en ella se completa la combustión de las cantidades residuales de constituyentes volátiles no destruidos en el mismo. El tiempo de residencia de los gases se recomienda al menos de 2s (Rodríguez Jiménez, 1999).

2.3.5 Lavado de gases

Los gases de combustión producidos de la incineración de RP contienen generalmente gases ácidos desde halógenos como ácido clorhídrico (HCl) en su mayor parte pero también puede formarse HBr o HF en menor proporción, además de compuestos sulfurosos oxidados (SO_2); en ellos se encuentran también partículas suspendidas (cenizas), y óxidos de nitrógeno producidos a partir de nitrógeno contenido en los residuos o en el aire de combustión (Arena, 2012).

La destrucción incompleta de los gases de combustión generados en los residuos sometidos a incineración puede dar lugar por reacciones secundarias a la formación de otros compuestos peligrosos tales como dibenzodioxinas y dibenzofuranos, cuya presencia en las emisiones, incluso a niveles de trazas, presenta importantes riesgos dado a su carácter cancerígeno y mutagénico, lo que se refleja en la imposición de límites regulatorios tan estrictos.

A continuación se describen los contaminantes más comunes encontrados en la corriente de salida de gases de un proceso de valorización energética de residuos peligrosos y los equipos de remoción generalmente utilizados:

Gases ácidos: lo constituyen gases como el fluoruro de hidrógeno (HF) o el cloruro de hidrógeno (HCl), que tienen como precursores materiales con flúor o cloro respectivamente. Se le llama lavado de gases ácidos al proceso a base de hidróxido de calcio o hidróxido de sodio mejor conocidos como cal y sosa respectivamente, que se utiliza para remover este tipo de componentes (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Óxidos de nitrógeno (NO_x): En procesos de combustión se forma principalmente óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2), conjuntamente llamados NO_x . El nitrógeno precursor de estos óxidos se encuentra en el aire utilizado como agente oxidante. La formación de NO_x puede prevenirse al usar un agente oxidante libre

de nitrógeno o mediante previa separación de componentes que contienen nitrógeno orgánico; mientras que un proceso utilizado en la remoción de NO_x es un lavador de amonio (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Dióxido de sulfuro (SO₂): Cualquier combustible que contenga azufre (S) formará SO₂ al oxidarse mediante combustión. Al igual que los gases ácidos, también se remueve mediante el lavador con solución básica (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Monóxido de carbono (CO): Es un compuesto altamente reactivo, que proviene de la oxidación parcial de materiales que contienen carbono. Su formación puede prevenirse mediante la alimentación de agente oxidante en abundancia, aire u oxígeno, para promover una combustión completa (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Material particulado: Está constituido por materiales que no hicieron combustión durante el proceso. Con el fin de remover partículas suspendidas en la corriente de gases pueden utilizarse equipos como precipitadores electrostáticos y filtros (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993).

Metales: Algunos de los componentes de los RP pueden contener metales, los cuales pueden ser liberados en cenizas de fondo (bottom ash) y cenizas volantes (fly ash) hacia la corriente de gases. Las tres categorías principales de metales a regular son el mercurio, metales de baja volatilidad como arsénico y cromo, y metales semi volátiles como plomo y cadmio (U.S. EPA, 2011).

Estas partículas y metales asociados están regulados por la NOM-098-SEMARNAT-2002, debido a que pueden liberar a los componentes peligrosos fuera

de la unidad y hacia la atmósfera. La correcta separación de los mismos es la mejor forma de prevenir el contenido de metales en la corriente de gases de combustión.

Dioxinas y furanos: En los sistemas de incineración se lleva a cabo la formación de productos orgánicos provenientes de combustión incompleta incluyendo especies cloradas como los policlorobifenilos o bifenilos policlorados (PBC), dibenzo-p-dioxinas policlorados (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF). Las dioxinas y furanos son una familia de sustancias tóxicas que comparten estructuras químicas similares. La formación de dioxinas producidas en la combustión se puede prevenir mediante el enfriamiento súbito de los gases y disminución de ciertos metales que contribuyen a la formación de los mismos (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993). El enfriamiento súbito se realiza mediante el intercambio térmico con una corriente de agua fría llamado apagado (quench). Otra forma de prevenir la formación de estos compuestos es mediante la temperatura de operación; en México los incineradores deben alcanzar una temperatura mínima de 850 °C y en caso de no poder comprobar que no se incineran compuestos clorados, la temperatura debe elevarse hasta 1,000 °C (NOM-098-SEMARNAT-2002).

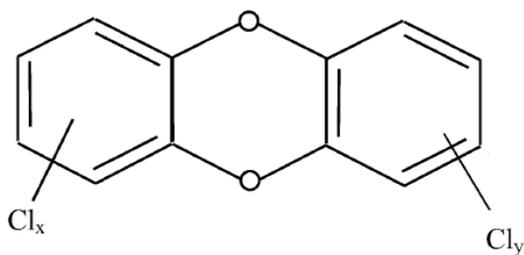


Figura 9. Estructura molecular de dibenzo-p-dioxinas policlorados.

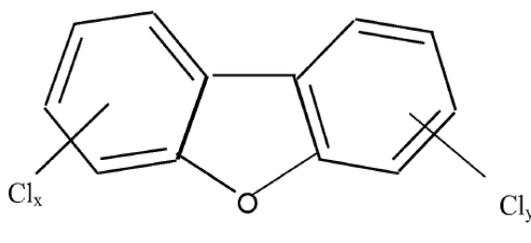


Figura 10. Estructura molecular de dibenzofuranos policlorados.

Fuente: (Stanmore, 2004)

Los gases de combustión en un proceso de aprovechamiento térmico de la energía contenida en una corriente de residuos dependen directamente de esta corriente precursora de residuos. La composición de los gases y la cantidad de

contaminantes presentes en ellos dependerá directamente de la composición de los residuos tratados. Por lo anterior es que un tren de tratamiento debe ser diseñado de acuerdo a las características específicas de los residuos y sus posibles productos; de manera que puedan cumplir con un nivel adecuado de calidad para emisiones a la atmósfera.

A continuación se describe el funcionamiento de los principales equipos de remoción de contaminantes en procesos de limpieza de gases de combustión.

2.3.5.1 Separación de partículas

El primer paso en la limpieza de gases es generalmente la remoción de partículas suspendidas en los gases, generalmente compuestas por cenizas. Los equipos generalmente usados en la remoción de cenizas son los siguientes.

Ciclón: Es un equipo cilíndrico al que los gases entran a gran velocidad y la separación se logra cuando las partículas impactan las paredes del equipo y caen al fondo del mismo. Eficiencia de remoción del 90% para partículas de un tamaño mayor o igual a $15\ \mu\text{m}$ (Figura 11).



Figura 11. Mecanismo de separación de partículas mediante ciclón.

Fuente: (Soler & Palau, 2013)

Filtros: También llamados filtros de mangas, consisten en una bolsa filtro hecha de un polímero resistente a condiciones ácidas y altas temperaturas, la cual se coloca sobre soportes metálicos y no permite el paso a partículas de tamaño superior a sus poros. Presentan eficiencia de 99% para partículas mayores a $2.5 \mu\text{m}$ (Figura 12).

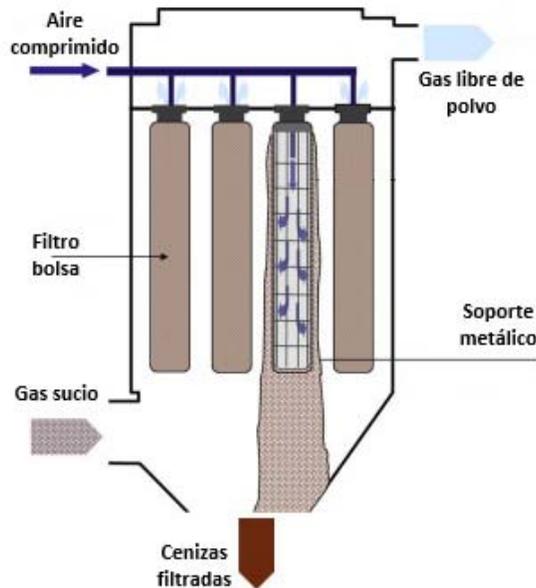


Figura 12. Mecanismo de separación de partículas mediante filtro.

Fuente: (Vehlow, 2014)

Precipitadores electrostáticos: como lo indica su nombre el principio de funcionamiento es fuerza electrostática, mediante una diferencia de potencial provocada por la carga negativa aplicada a dos platos paralelos. Las partículas contenidas en los gases, y que se encuentran cargadas positivamente, precipitan al pasar por los platos metálicos y pueden ser removidas. Presentan una eficiencia del 99.5% para partículas de $10 \mu\text{m}$ (Figura 13).

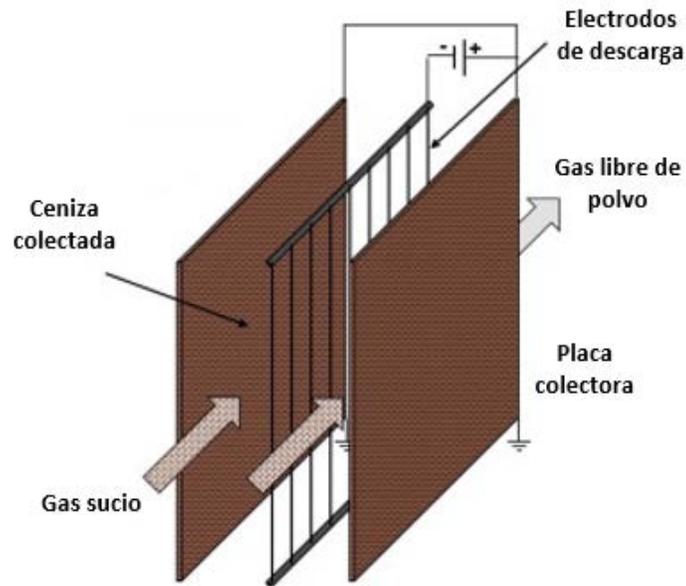


Figura 13. Mecanismo de separación de partículas mediante precipitador electrostático

Fuente: (Vehlow, 2014)

2.3.5.2 Abatimiento de gases ácidos

Existen dos tipos principales de sistemas para remover gases ácidos de la corriente de gases de combustión que se describen a continuación.

Lavadores húmedos: Un sistema de lavado de gases húmedo consiste en dos etapas, la primera para romper las moléculas de los halógenos y la segunda para estabilizar, neutralizar y separar los componentes ácidos de la corriente de gases. El principio por el que funcionan estos sistemas es el de absorción, en el cual los componentes se distribuyen en la superficie de un material poroso y se facilitan las reacciones previamente descritas. Las sustancias que reaccionan con los componentes ácidos se encuentran disueltos en agua y por ello se les llama húmedos.

Lavadores secos: En estos sistemas los gases ácidos reaccionan con un sólido o semi-sólido inyectado en la corriente gaseosa. Es un sistema más simple a comparación del sistema húmedo, pero que genera una mayor cantidad de sólidos a disposición final. Generalmente se utiliza cuando la corriente de gases contiene un nivel elevado de humedad, ya sea por inyección o por su composición de salida del horno.

2.3.5.3 Abatimiento de NOx

La remoción de óxidos de nitrógeno, formados a partir del nitrógeno contenido en los residuos o en el aire de combustión, se lleva a cabo mediante dos tipos de sistemas que se describen a continuación.

Reducción selectiva no catalítica: Funciona a partir de la inyección de amoníaco (NH_3) o urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) reduciendo los óxidos de nitrógeno (NO_x) a nitrógeno molecular N_2 . La temperatura de operación debe estar en un intervalo entre 900°C y 1000°C , para evitar el congelamiento del producto intermedio de las reacciones de reducción (N_2O) a temperaturas menores, y para evitar la oxidación del NH_3 , que se da a 1050°C .

Reducción selectiva catalítica: este sistema se instala generalmente al final del sistema de limpieza de gases; en él se reducen los NO_x a N_2 mediante NH_4^+ u otros compuestos nitrogenados, aprovechando la actividad de diferentes metales que favorecen la reacción de reducción. La temperatura de operación necesita estar en un intervalo entre 300°C y 400°C .

2.3.5.4 Abatimiento de dioxinas

La formación, o prevención de formación, de dioxinas puede realizarse mediante el adecuado control de la combustión, minimización de polvo liberado en el lecho del reactor y precipitación de cenizas a una temperatura menor de 200°C .

En la Tabla 7 se resume mediante una breve descripción los principales equipos utilizados para la remoción de agentes contaminantes en un sistema de limpieza de gases.

Tabla 7. Equipos utilizados en la limpieza de gases

Contaminante objetivo	Equipo utilizado en la remoción	Descripción
Separación de partículas	Ciclón	El mecanismo de separación se lleva a cabo mediante el impacto inercial de las partículas, obteniendo una eficiencia de remoción del 90% para partículas de un tamaño mayor o igual a 15µm.
	Precipitador electrostático	El mecanismo de separación se lleva a cabo mediante fuerza electrostática, obteniendo una eficiencia de remoción del 99.5% para partículas de 10µm.
	Filtros	La tela de filtro es principalmente un polímero con alta temperatura y resistencia a los ácidos que permite obtener una eficiencia de remoción del 99% para partículas mayores a 2.5 µm.
Abatimiento de gases ácidos	Lavadores húmedos	Uso de líquido de lavado para absorber los gases ácidos, los principales agentes de neutralización son sosa (NaOH) y cal (Ca(OH) ₂).
	Lavadores secos	Los gases ácidos reaccionan con un sólido o semi-sólido inyectado en la corriente gaseosa, los agentes utilizados son aquellos que contienen calcio como CaCO ₃ , CaO, Ca(OH) ₂ o NaHCO ₃ .
Abatimiento de NOx	Reducción selectiva no catalítica (SNCR)	Inyección de amoníaco (NH ₃) o urea (CH ₄ N ₂ O) como agentes reductores.
	Reducción selectiva catalítica (SCR)	Inyección de amoníaco (NH ₃) como agente reductor, la temperatura de operación necesita estar en un intervalo entre 300°C y 400°C.
Abatimiento de dioxinas	Control de la combustión	Se requiere un adecuado control de la combustión, minimización de polvo liberado en el lecho del reactor y precipitación de cenizas a una temperatura menor de 200°C.

Fuente: (Vehlow, 2014)

2.3.6 Recuperación de energía

La recuperación de calor es la transferencia de energía de una corriente de proceso a otra, sin la adición de trabajo o alguna otra forma de energía por una fuente externa (SENER, 2009).

La posibilidad de recuperar parte del calor de combustión de los residuos, constituye una opción a considerar en una planta de incineración de residuos. La energía residual de los gases puede aprovecharse para la producción de vapor, con o sin generación subsiguiente de energía eléctrica, para precalentar el aire alimentado al sistema de combustión o corrientes residuales para mejorar las propiedades de la corriente de alimentación al incinerador (Rodríguez Jiménez, 1999).

Para recuperar el calor residual de los gases de combustión, comúnmente se utilizan equipos como calderas de recuperación, precalentadores de aire e intercambiadores de calor.

Las calderas de recuperación, también llamadas sistemas HRSG son ampliamente usados en plantas de potencia y plantas de proceso para recuperar energía de varias corrientes de desecho por consideraciones de proceso o economía (Ganapathy, 1991). Asimismo se utilizan a menudo en incineradoras tanto como un medio para recuperar el calor útil y/o para enfriar los gases de combustión como medio de control de la contaminación del aire (Niessen, 2002).

Para el diseño de una caldera de recuperación es necesario conocer las características de los gases de combustión así como los requerimientos de vapor del sistema.

Calderas pirotubulares o de tubos de humo: Se llaman de esta manera debido a que la corriente de gases de combustión fluye por dentro de los tubos (Figura 14). En este tipo de calderas se genera vapor saturado de baja presión por fuera de los tubos y se utilizan para el manejo de gases de combustión que contienen una baja concentración de gases ácidos y de partículas no fusibles.

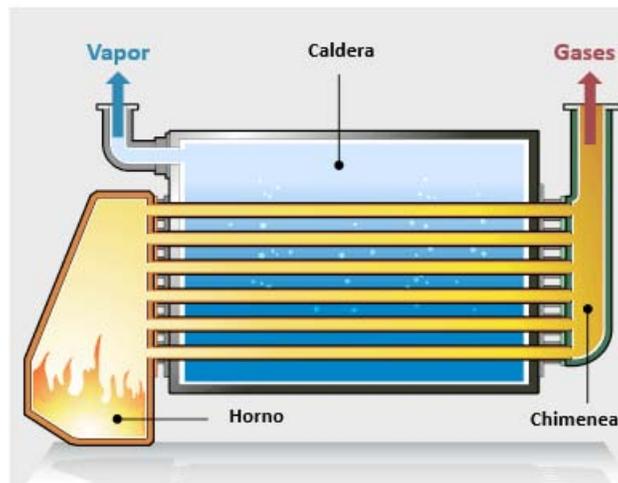


Figura 14. Caldera de tubos de humo
Fuente: (Brain, 2008)

Calderas acuotubulares o de tubos de agua: En este tipo de calderas dentro de los tubos fluye el agua, mientras que la corriente de gases de combustión pasan alrededor de los tubos (Figura 15). Son adecuadas para operar con altas presiones de vapor, temperatura y capacidad. Asimismo manejan gases de combustión que contienen una alta cantidad de gases ácidos y moderada carga de partículas no fusibles (Ganapathy, 1991).

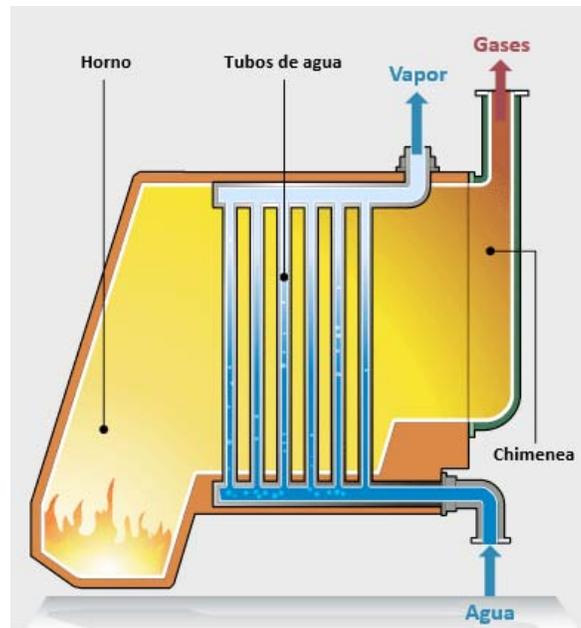


Figura 15. Caldera de tubos de agua

Fuente: (Brain, 2008)

Como todo sistema, las calderas de recuperación de calor constan de una gran variedad de elementos para su buen funcionamiento, sin embargo los componentes más importantes son el economizador, evaporador y sobrecalentador, los cuales ayudan a aumentar la eficiencia térmica del generador de vapor.

Economizador: Recupera el calor de los gases de combustión para retornarlo y de esta manera precalentar el agua de alimentación a la caldera.

Evaporador: En este equipo se lleva a cabo la separación del vapor y agua, la fase líquida se recircula y se lleva a una temperatura cercana a la de saturación para pasar a la fase vapor. El vapor saturado puede ser el producto deseado, o ser calentado aún más en el sobrecalentador.

Sobrecalentador: Utiliza los gases calientes para sobrecalentar el vapor saturado o húmedo, de esta manera se aumenta la entalpía del fluido, obteniendo una mayor energía útil para la generación de electricidad (Niessen, 2002).

3. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Este apartado sirve para definir el alcance del proyecto al cual se le hará el estudio de factibilidad tomando como base lo siguiente:

- a) Planta incineradora piloto, donde se toma como modelo la tecnología de horno rotatorio como equipo central del proceso y del cual se realizará un diagnóstico con el fin de identificar áreas de oportunidad en el proceso de incineración de RP.

- b) Comparación de experiencias internacionales de plantas de incineración, que cuenten con tecnología de horno rotatorio y tratamiento de gases, debido a que se busca la mejora en la configuración del proceso.

3.1 Descripción del sistema piloto

A través de la operación de una planta piloto a ciertas condiciones definidas y controladas se puede predecir el comportamiento que presentará una planta a nivel industrial en condiciones similares o iguales a las estudiadas, permitiendo realizar estudios de factibilidad para una nueva planta o implementar mejoras a un proceso ya existente. En este apartado se realiza la descripción actual del proceso de incineración de residuos peligrosos a nivel piloto, mencionando las características principales en la Tabla 8.

Tabla 8. Características principales del sistema de incineración a nivel piloto

Parámetro / etapa	Característica
Capacidad	1.5 t/h
Tipo de horno	Rotatorio
Tipo de residuo	RP sólidos
Combustible	Diésel
Limpieza de gases	Quencher + Scrubber
Recuperación de energía	Intercambiador tubos y coraza

3.1.1 Alimentación de residuos peligrosos

Con la finalidad de tener un suministro de características homogéneas, el sistema cuenta con una fase para la reducción del tamaño de partícula de los residuos a alimentar sin importar la naturaleza de la composición de la mezcla. La disminución del tamaño de los residuos alimentados incrementa el área de contacto con el oxígeno y favorece la combustión. La reducción del tamaño de partícula de los RP se realiza empleando un equipo electromecánico.

3.1.2 Cámaras de combustión

Mediante el tratamiento térmico de incineración se eliminan RP produciendo una corriente de gases de combustión a altas temperaturas y cenizas como subproducto. En el sistema de recolección se extraen las cenizas generadas que se acumulan en la sección final de cada cámara; en la primera se recolecta la mayor cantidad de cenizas mediante un eje con hélices (tornillo sin fin), el cual las empuja hacia un extremo donde son depositadas en un contenedor, mientras que en la segunda se recolecta el restante.

3.1.3 Sistema de control de emisiones

Inicialmente los gases de combustión pasan por un enfriador que disminuye su temperatura de manera súbita, con el fin de evitar la formación de dioxinas y furanos. El control de emisiones reduce la cantidad de gases y partículas contaminantes presentes en los gases producto de la combustión, mediante un proceso de lavado (scrubber) con una sustancia básica que neutraliza la corriente ácida.

3.1.4 Recuperación de energía

Debido a que inicialmente no se consideraba el aprovechamiento de la energía térmica proveniente de la corriente caliente de gases, se adaptó al final del proceso un sistema de intercambio de calor de tubos y coraza.

3.2 Experiencia operacional que respalda la propuesta de incineración de RP

Como se ha mencionado anteriormente una de las características importantes para la implementación de una tecnología de valorización energética de residuos como alternativa de disposición o tratamiento es la experiencia con la que cuente dicha tecnología, es decir la operación exitosa de una planta que opere con dicha tecnología en condiciones similares.

El uso de tecnologías de valorización energética de residuos es una práctica que se ha implementado durante varias décadas en ciertos países y en algunos otros con menor tiempo de experiencia. Actualmente existe una cantidad importante de plantas de incineración de residuos que cuentan con un tren de tratamiento para los gases de combustión que les permiten cumplir con la normatividad en materia de emisiones a la atmósfera y recuperación de calor para su posterior utilización.

En la Tabla 9 se enlistan algunos ejemplos de plantas de incineración en operación, las cuales cuentan con tecnología de horno rotatorio, etapa de recuperación de calor y limpieza de gases, en ella se mencionan sus principales características como son localización, periodo de operación y capacidad de tratamiento.

Tabla 9. Plantas de incineración en Europa que cuentan con tecnología de horno rotatorio.

Nombre de la planta	Localización	Inicio operación	Capacidad (t/h)	Caldera recuperación	Sistema de tratamiento de gases
AWG	Wuppertal, Alemania	1998	15	S	WET/SD/ESP/SCR
Vestforbrænding	Glostrup, Dinamarca	1970	10	HW	SNCR+ESP+FF+WET
KARA/NOVEREN Roskilde	Roskilde, Dinamarca	1980	7	WW	SNCR+SD+FF
Reno-Nord	Aalborg, Dinamarca	1980	8	HW	SD+ESP
UIOM de Cenon	Cenon, Francia	1983	8	S	ESP+WET
Fort de France-Martinique	Fort de France-Martinique, Francia	2002	7	S	WET+FF+SNCR
Grenoble (La Tronche)	Grenoble, Francia	1995	8	S	WET
Reims	Reims, Francia	1989	6.5	S	DRY+FF
Lagny	St Thibault des Vignes, Francia	1985	8	S	ESP+DRY+FF+SNCR
Toulouse	Toulouse Mirail, Francia	1997	14	S	DRY+WET+FF+SNCR
AVR	Duiven, Holanda	1975	15	S	SNCR/ESP/WET
Belvedere	Londres, Inglaterra	1970	15	S	ESP/SD/FF
Macchiareddu	Macchiareddu, Italia	1995	3.33	S	WET
	Kumla, Suecia	1983	5	S	SD/FF/MERCOX
Bristaverket	Stockholm, Suecia	1970	11	S	DRY+WET+FF+FGC

HW: Agua caliente (temperatura > 120°C), WW: Agua tibia (temperatura < 120°C), S: Vapor, SNCR: Reducción selectiva no catalítica, SCR: Reducción selectiva catalítica, ESP: Precipitador electrostático, FF: Filtro de mangas, DRY: Lavador seco, SD: Lavador semisecco, WET: Lavador húmedo
Fuente: (ISWA, 2012)

3.3 Caso de estudio

En este apartado se realiza la propuesta del sistema de incineración de RP, control de emisiones a la atmósfera y recuperación de calor considerando como modelo base la planta piloto para el escalamiento del proyecto, tomando la tecnología de incinerador horno rotatorio como equipo central del proceso.

Mediante una evaluación técnica-ambiental se determinará la viabilidad del sistema de incineración de RP, la cual debe cumplir con las condiciones de operación y límites de emisiones de contaminantes de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, así como una evaluación económica para determinar la rentabilidad del proyecto.

En la Figura 16 se presenta el diagrama de bloques del proceso propuesto para el sistema de incineración de RP.

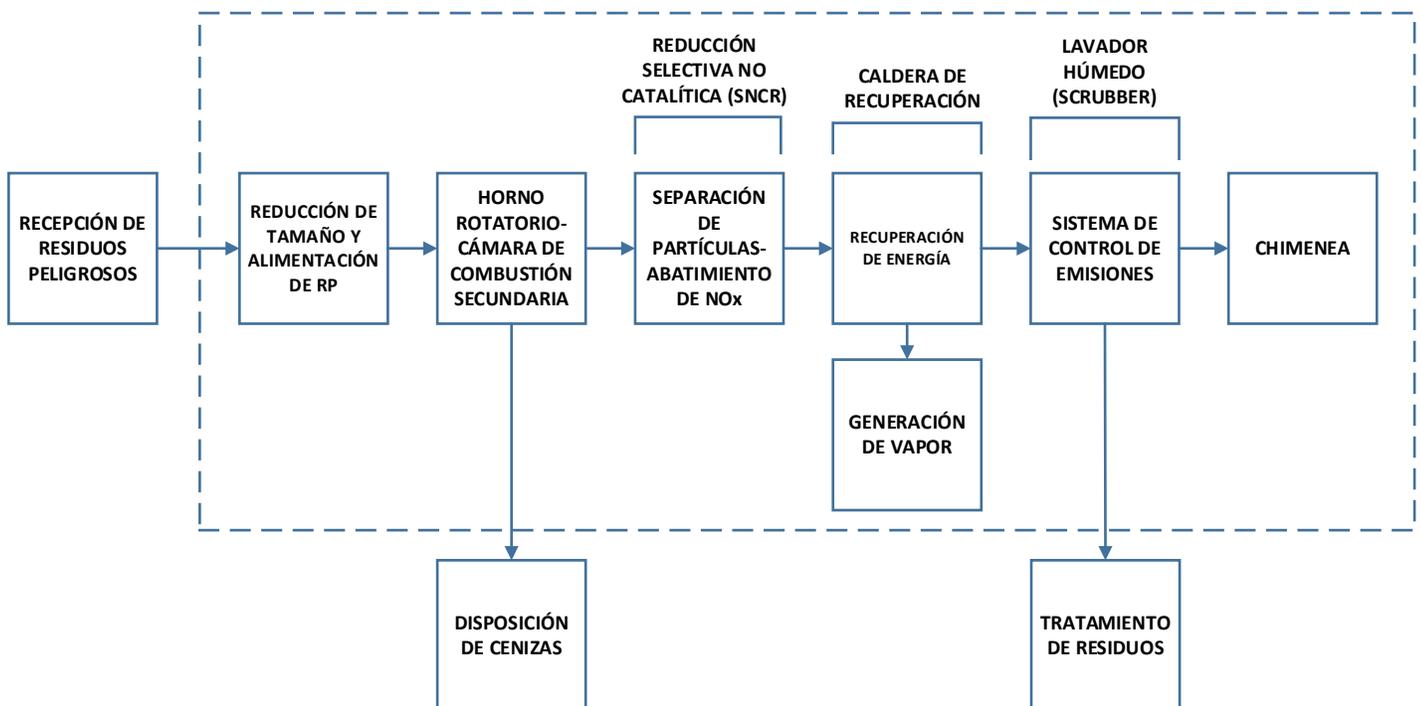


Figura 16. Diagrama del proceso de incineración de RP propuesto

3.3.1 Premisas

Para llevar a cabo la evaluación técnica y ambiental se muestran las premisas que se deben cumplir (Tabla 10) de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, para lograr un buen desempeño del proceso de incineración de RP y tratamiento de los gases de combustión generados.

Tabla 10. Condiciones de operación señaladas por la normatividad mexicana

Parámetro	Descripción	
Capacidad	4.5 t/h	
Tipo de residuos	Residuos peligrosos sólidos	
Criterios de combustión		
Entorno de reacción	Oxidante, cantidad mayor que la requerida por la combustión estequiométrica	
Reactivo	Aire	
Temperatura de las cámaras de combustión	>850 °C tras la última inyección de aire de combustión 1100 °C en caso de contener más del 1% de sustancias organocloradas	
Tiempo de residencia en CC2	> 2 segundos (suficiente destrucción de compuestos orgánicos)	
Combustible	Diésel	
Presión	1 atm	
Criterios para el tratamiento de gases		
Control de partículas y gases ácidos	Nulo	Se emiten contaminantes a la atmósfera
	Básico	Hay remoción de partículas
	Avanzado	Hay remoción de partículas y gases ácidos
Temperatura a la salida de la chimenea	< 250 °C furanos	Posibilidad baja de formación de dioxinas y
Productos y subproductos del proceso		
Gases producidos	CO ₂ , H ₂ O	
Medición de contaminantes	CO, SO ₂ , NO _x , HCl	
Cenizas	A disposición de residuos	
Residuos a partir del sistema de control de emisiones	A disposición de residuos	

Las premisas económicas a utilizar en este documento para determinar la viabilidad económica del proyecto se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Premisas económicas

Parámetro	Descripción
Horas de operación	24 horas
Periodo del proyecto	10 años
Tasa de interés	12%
Moneda	USD dólares
Tipo de cambio	14.80 pesos (MXN), valor promedio FIX correspondiente a los meses de enero y febrero 2015 del Banco de México.
Contingencias	Se toma en cuenta para el estimado de inversión un margen típico de contingencias del 37 % sobre el monto directo de inversión. (Peters, 2003)
Mantenimiento	Se utilizará un costo estimado por mantenimiento general equivalente a 5 % sobre el costo de los equipos involucrados en el proyecto de la inversión.
Horas laborales	El sistema operará con un factor de servicio de 328 días por año, tomando en cuenta tres turnos de 8 horas.
Mano de obra	Igual al costo de la mano de obra directa necesaria para la operación de la planta, incluyendo los 3 turnos.
Depreciación	Se considerará depreciación lineal a 10 años de los equipos mayores. (SHCP, 2012)
Capital de trabajo	Se considerará el 15% del capital de inversión.
Costo del terreno	Se considera un costo asociado dentro del capital de trabajo.
Cargos de capital	Se considera un 30% del I.S.R y 10% del pago por Participación de los Trabajadores sobre las Utilidades P.T.U.
Indicadores financieros	Serán evaluados después de impuestos.
Análisis de sensibilidad	El análisis de sensibilidad se realiza a partir de la variación de tres factores de impacto al proyecto: inversión, operación y mantenimiento e insumos. Con lo anterior, revisará como es afectado el VPN y la TIR del proyecto.

3.3.2 Descripción del proceso

Los límites de batería para el proceso de incineración comprenden la recepción de los RP en la tolva de alimentación hasta la salida de gases de las cámaras de incineración. Por otra parte el límite de batería para vapor generado a partir del aprovechamiento de los gases de combustión comprenderá hasta su generación, este podría ser utilizado como vapor a proceso, generación de electricidad o para el precalentamiento del aire hacia las cámaras de combustión. Los subproductos generados a partir del proceso serán enviados a disposición.

Los RP serán alimentados al horno de incineración, mediante un equipo automatizado, éstos contarán con una previa reducción de tamaño con el fin de incrementar el área de contacto con el oxígeno para favorecer la combustión y evitar obstrucciones hacia el horno. Se considera una previa clasificación de los residuos a incinerar con el fin de evitar residuos sólidos que contengan metales que puedan causar incrustaciones en el revestimiento del material refractario de la cámara de combustión.

El sistema contará con dos quemadores para realizar la combustión con aire, uno para la quema de residuos y el otro para completar la combustión de los gases generados. El sistema puede usar combustible convencional, como gas lp, gas natural y diésel. El sistema de incineración debe garantizar la destrucción térmica de los RP a alimentar en el sistema y trabajar en condiciones que eviten la formación de contaminantes que serán liberados como emisiones a la atmósfera resultantes del proceso; además debe garantizar una combustión homogénea de los residuos.

Mediante un sistema de recolección de cenizas, se extraerán los productos sólidos generados de la combustión en el incinerador donde se recogerán en la sección final de cada cámara de combustión; en la primera cámara se recolecta la mayor cantidad, mientras que en la segunda cámara se recolecta el restante.

Posteriormente a los gases de combustión se les inyectará amoníaco (NH_3) para llevar a cabo una reducción selectiva no catalítica (SNCR) en donde se reducirán los óxidos de nitrógeno (NO_x) a nitrógeno molecular N_2 con el fin de disminuir los riesgos de corrosión dentro de la caldera de recuperación de energía y evitar la emisión de estos contaminantes hacia la atmósfera al término del proceso.

A continuación el calor generado a partir de los gases de combustión será aprovechado mediante una caldera de recuperación de tubos de agua debido a la presencia de gases ácidos, en la cual se generará vapor de alta presión.

Debido a que se requiere de un mayor tratamiento y reducción de contaminantes antes de ser enviados a la chimenea, el gas enfriado se introducirá a un lavador húmedo (scrubber) en donde los gases de combustión se ponen en contacto con una corriente de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para estabilizar, neutralizar y separar los componentes ácidos de la corriente de gases (SO_x , HCl).

Finalmente el gas remanente será enviado a una chimenea en donde será liberado hacia la atmósfera.

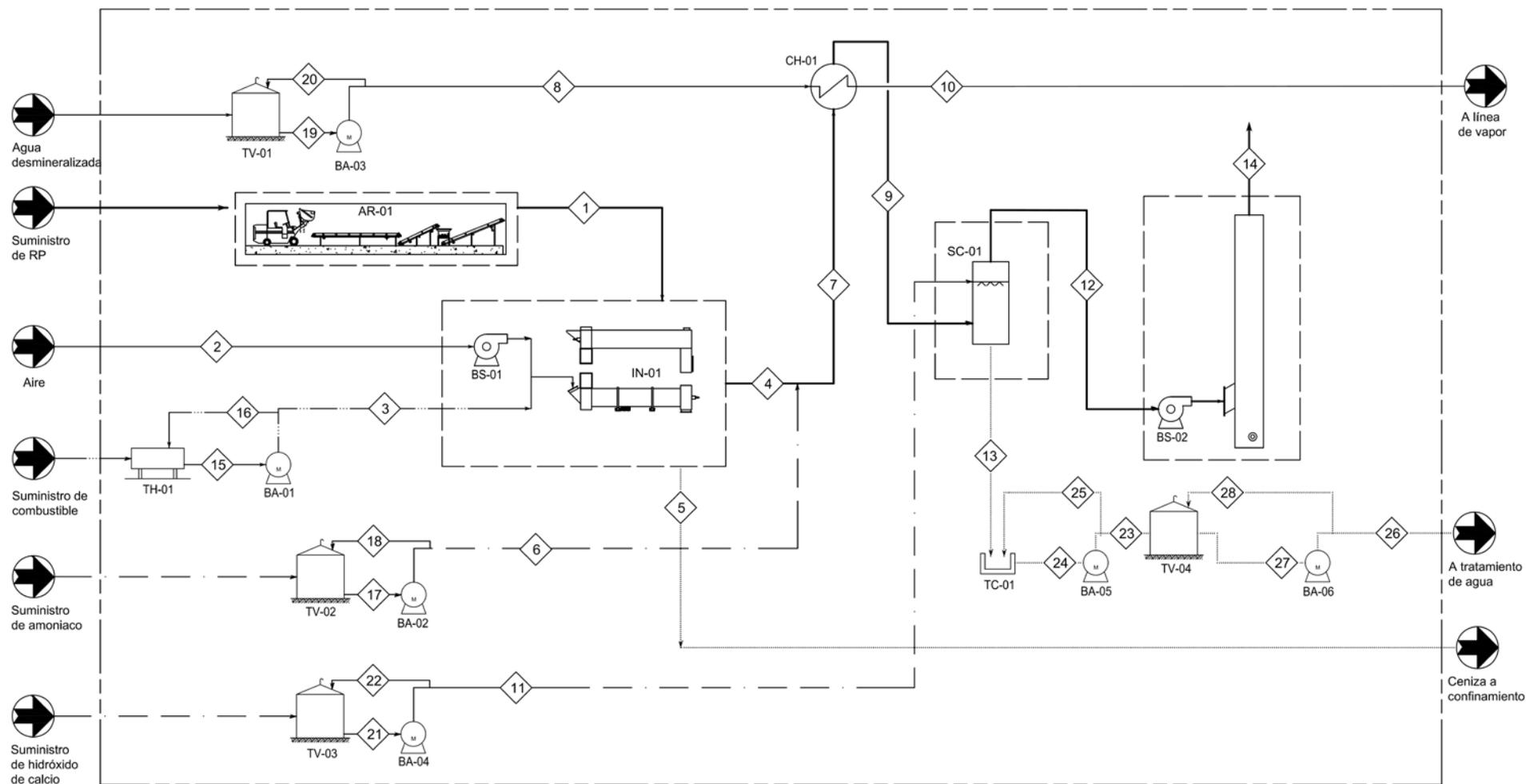
Se tomarán en cuenta como equipos principales los involucrados directamente en el proceso, así como los necesarios para el transporte y alimentación de servicios auxiliares, en la Tabla 12 se enlistan dichos equipos, los cuales a su vez se muestran en el diagrama de flujo de proceso del sistema.

Tabla 12. Lista preliminar de equipos

No.	TAG	Equipo mayor
1	AR-01	Equipo paquete para la alimentación de RP
2	BA-01	Bomba suministro de diésel
3	BA-02	Bomba suministro de solución de amoniaco
4	BA-03	Bomba suministro de agua desmineralizada
5	BA-04	Bomba suministro de solución de hidróxido de calcio
6	BA-05	Bomba de achique de agua ácida
7	BA-06	Bomba de agua ácida a disposición
8	CH-01	Caldera de recuperación
9	IN-01	Incinerador
10	SC-01	Scrubber
11	TC-01	Cárcamo de agua ácida
12	TH-01	Tanque de diésel
13	TV-01	Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada
14	TV-02	Tanque de almacenamiento de solución de amoniaco
15	TV-03	Tanque de almacenamiento de solución de hidróxido de calcio
16	TV-04	Tanque de almacenamiento de aguas ácidas

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Diagrama de flujo de proceso del sistema de incineración de RP



4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

En este apartado se desarrolla la metodología de evaluación técnica-ambiental y económica correspondientes al estudio de factibilidad del proyecto. La metodología propuesta se muestra en la Figura 17.

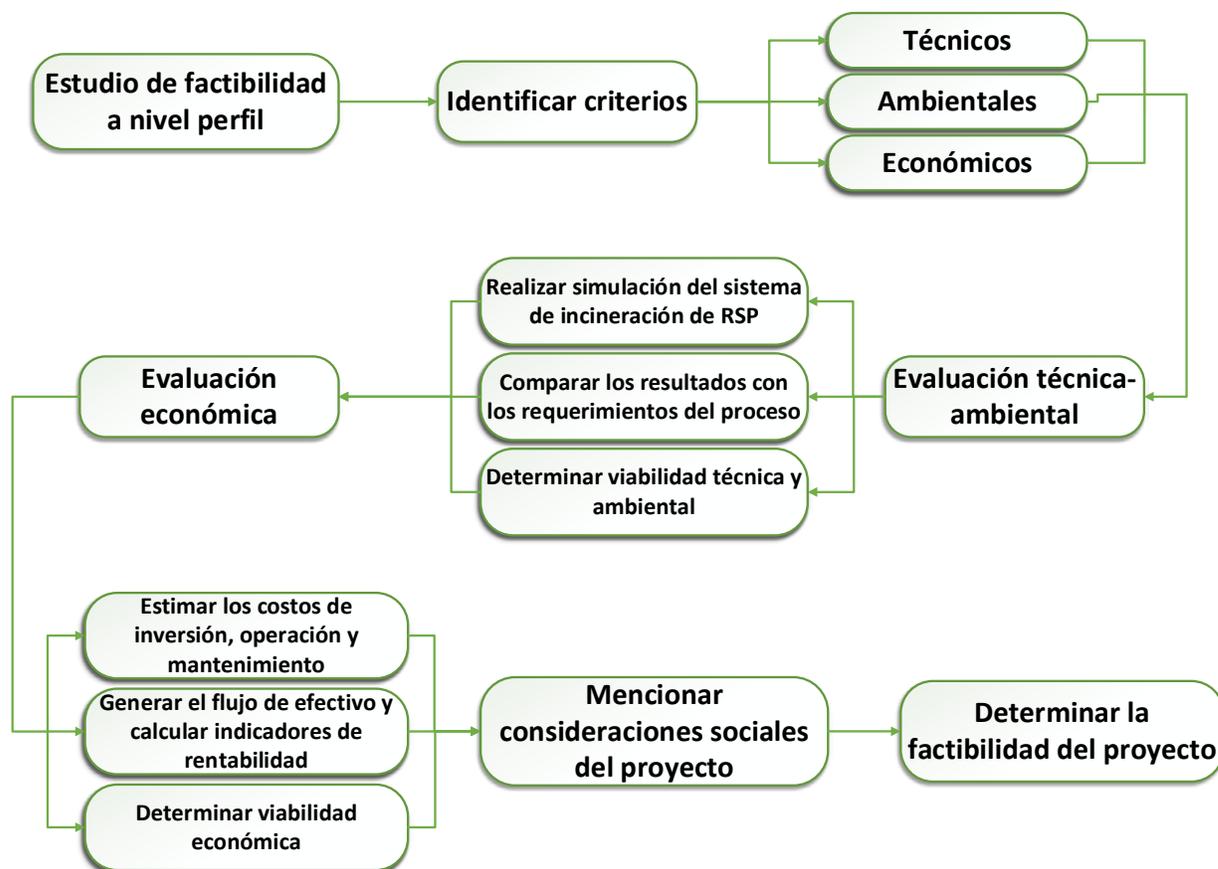


Figura 17. Metodología propuesta para realizar es estudio de factibilidad a nivel perfil del sistema de incineración de RP

4.1 Evaluación técnica-ambiental

La evaluación técnica y ambiental se llevó a cabo con el fin de determinar si el sistema de incineración propuesto puede tratar efectivamente los residuos peligrosos, cumpliendo con los requerimientos establecidos por la normatividad aplicable de acuerdo a la SEMARNAT.

4.1.1 Simulación del sistema de incineración

La evaluación técnica-ambiental se llevó a cabo mediante una simulación del proceso de incineración utilizando Aspen Plus®, un software especializado en procesos.

4.1.2 Análisis de la viabilidad técnica y ambiental

A partir de los resultados obtenidos de la simulación, se compararon las condiciones técnicas requeridas durante la combustión de los RP, así como los parámetros ambientales para cumplir con los límites de emisión de contaminantes hacia la atmósfera de acuerdo a la norma NOM-098-SEMARNAT-2002, con la finalidad de lograr una operación adecuada y determinar la viabilidad del sistema de incineración de residuos peligrosos.

4.2 Evaluación económica

En la evaluación económica del proyecto se estimaron los costos de inversión, operación y mantenimiento de los equipos principales para la incineración de RP, incluyendo los sistemas de pretratamiento, combustión de los residuos, limpieza de gases y aprovechamiento térmico de los mismos. Asimismo se generó un flujo de efectivo en un periodo determinado para el cálculo de rentabilidad del proyecto.

4.2.1 Estimación de los costos de inversión, operación y mantenimiento

El estimado del monto de inversión de capital para el proyecto, se determinó mediante cotizaciones de equipos de capacidades o características similares que cumplan con las especificaciones para operación, los materiales y su instalación, mediante métodos estocásticos obtenidos a través de publicaciones especializadas. Los costos de operación se relacionaron con un balance de materia preliminar, tomando en cuenta los costos de cada insumo requerido para operar la planta de incineración de acuerdo a cotizaciones obtenidas.

Los costos de mantenimiento se estimaron como un porcentaje del costo de inversión estimado de los equipos principales.

4.2.2 Generación de flujo de efectivo

Con la información de inversiones, costos y beneficios de la operación de la planta incineradora, los costos derivados del mantenimiento así como los costos y gastos fijos de la planta, se elaboró el flujo de efectivo del proyecto y la evaluación económica a valor constante.

4.2.3 Cálculo de indicadores de rentabilidad

Se obtuvieron los principales indicadores de rendimiento del proyecto; es decir, el VPN, TIR y PRI. Por último mediante los indicadores económicos previamente definidos se modificaron las variables con mayor impacto en la rentabilidad del proyecto en un intervalo de variación definido: inversión, operación y mantenimiento e insumos.

5. RESULTADOS DEL ESTUDIO A NIVEL PERFIL

A continuación se desarrollan las evaluaciones técnica-ambiental y económica para determinar la factibilidad de implementar un proceso de valorización energética mediante incineración como tratamiento de residuos sólidos peligrosos.

5.1 Evaluación técnica-ambiental

La evaluación técnica y ambiental se evaluó en conjunto, debido a que al conocer y verificar las condiciones de operación necesarias para llevar a cabo el proceso de incineración y limpieza de gases se determinó si el sistema opera de manera correcta e eficiente de acuerdo a la normatividad aplicable, caso contrario identificó la etapa o equipos que no están cumpliendo con dichos requerimientos.

El sistema de incineración de residuos peligrosos a evaluar cuenta con la tecnología de un horno rotatorio, una cámara de combustión secundaria también llamada cámara de post-combustión, un sistema de recuperación de energía y un sistema de lavado de gases.

5.1.1 Simulación del sistema de incineración

Se realizó la simulación del proceso de incineración de RP mediante el software Aspen Plus®, dividiéndose en las siguientes etapas.



- 1) Alimentación.
- 2) Combustión de los RP.
- 3) Limpieza y aprovechamiento de los gases.

5.1.1.1 Alimentación

Para simular la incineración de residuos se requiere de la información de la composición elemental de los mismos, debido a que las características de la alimentación de estos residuos no se encuentran dentro de la base de datos de Aspen Plus®, se definió como compuesto no convencional.

El análisis elemental de los RP se generó a partir de la consulta de bibliografía especializada en residuos peligrosos en donde se consideraron los mismos porcentajes de composición característica utilizados en el sistema piloto, la cual incluye 80% textiles, 10% plásticos, 5% madera y 5% papel y cartón los cuales están impregnados de hidrocarburos, solventes, aceites, pinturas y otras sustancias consideradas como residuos peligrosos.

En la Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se muestra la caracterización elemental de residuos peligrosos que ofrecen las fuentes bibliográficas.

Tabla 13. Composición elemental de la alimentación de RP

%	Tipo de residuo	% masa en base seca						
		C	H	O	N	S	Cl	Ash
80	Textil	48	6.4	40	2.2	0.2	0	3.2
10	Plástico	63.3	6.3	17.6	6	0.1	2.4	4.3
5	Madera	48.2	5.9	44.1	0.2	0.1	0	1.5
5	Papel	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	0	6
Ponderación		49.31	6.335	38.18	2.385	0.185	0.24	3.365

Fuente: (Tchobanoglous, Integrated Solid Waste Management, 1993)

Tabla 14. Análisis elemental extraído del libro Hazardous Air Emissions from Incineration

%	Tipo de residuo	% masa en base seca					
		C	H	O	N	S	Ash
80	Textil	46.19	6.41	41.85	2.18	0.2	3.17
10	Plástico	67.21	9.72	15.82	0.46	0.07	6.72
5	Madera	52.55	6.08	40.9	0.25	0.1	0.12
5	Papel	44.74	6.1	41.92	0.15	0.16	6.93
	Ponderación	48.5375	6.709	39.203	1.81	0.18	3.5605

Fuente: (Brunner, 1993)

Tabla 15. Análisis elemental extraído del libro Waste Management Practices

%	Tipo de residuo	% masa en base seca					
		C	H	O	N	S	Ash
80	Textil	55	6.6	31.2	4.6	0.1	2.5
10	Plástico	60	7.2	22.8	0	0	10
5	Madera	49.5	6	42.7	0.2	0.1	1.5
5	Papel	43.5	6	44	0.3	0.2	6
	Ponderación	54.65	6.6	31.575	3.705	0.095	3.375

Fuente: (Pichtel, 2005)

Tabla 16. Análisis elemental extraído del artículo Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant

Tipo de residuo	% masa en base seca						
	C	H	O	N	S	Cl	Ash
Alimentación	50.23	4.37	28.48	1.22	0.76	1.13	13.81

Fuente: (Jannelli & Minutillo, 2007)

A partir de las fuentes bibliográficas mencionadas anteriormente, se realizó un promedio de las ponderaciones, la cual se promedió con la caracterización del balance de materia y energía proporcionado por la planta piloto (Tabla 17). Los valores de N, S y Cl se tomaron directamente del promedio bibliográfico debido a que la caracterización de la planta piloto no reporta dichos componentes.

Tabla 17. Análisis elemental que presenta la planta piloto

Tipo de residuo	% masa en base seca						
	C	H	O	N	S	Cl	Ash
Alimentación	45	5	35	0	0	0	15

Fuente: Informe sistema de incineración de la planta piloto.

A su vez a la composición elemental en base seca se le agrega un 20% de humedad definido a partir de las referencias bibliográficas. Debido a que no se considera un secador como pretratamiento de los RP es necesario que la composición muestre el porcentaje de humedad contenido, ambas composiciones se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Composición elemental de la alimentación de RP

Componente	% masa base seca	% masa base húmeda
C	47.840 %	38.272 %
H	5.500 %	4.400 %
N	2.280 %	1.824 %
Cl	0.342 %	0.274 %
O	34.679 %	27.743 %
Cenizas	9.054 %	7.243 %
S	0.305 %	0.244 %
H ₂ O	0.00 %	20.00 %
Total	100 %	100 %

Fuente: Elaboración propia

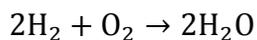
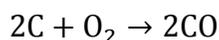
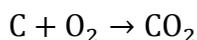
Dado que el poder calorífico de los residuos peligrosos depende directamente de su composición, la mezcla característica en base húmeda posee un poder calorífico de 15,096 kJ/kg (3,608 kcal/kg).

5.1.1.2 Combustión de los RP

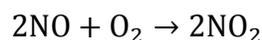
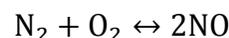
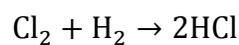
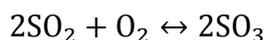
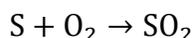
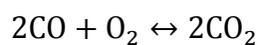
El sistema de incineración de residuos peligrosos comprende el horno rotatorio y la cámara de combustión secundaria de gases, los cuales se simulan mediante un reactor de conversión (RYield), un reactor de Gibbs (RGibbs) y un separador ciclónico (SSplit).

La alimentación descrita anteriormente ingresa al reactor de conversión (RYield) en donde se simula la descomposición de los residuos en los componentes convencionales que los constituyen, acorde a la composición elemental reportada. Los componentes convencionales generados pasan a un reactor de (Gibbs), donde se simula tanto la primera cámara de combustión, así como la cámara de combustión secundaria donde se efectúan propiamente las reacciones de combustión consideradas para el proceso, las cuales se muestran a continuación.

Reacciones principales:



Reacciones secundarias:



El efluente gaseoso que sale del reactor de Gibbs se alimenta al separador ciclónico para eliminar el contenido de ceniza (Figura 18). Para fines de la simulación, el separador ciclónico elimina el contenido de sólidos de la corriente de salida de las cámaras de combustión, sin embargo la separación principal de cenizas sucede al final de la cámara de combustión primaria mediante un sistema mecánico, el cual empuja las cenizas hacia el extremo de la cámara donde son depositadas en un contenedor, recolectando aproximadamente el 98% del producto total. Asimismo es necesario el implemento de filtros durante el proceso para la remoción de partículas suspendidas en los gases, las cuales están compuestas en su mayoría por cenizas, siendo esta la razón de poner especial atención en su captura y separación.

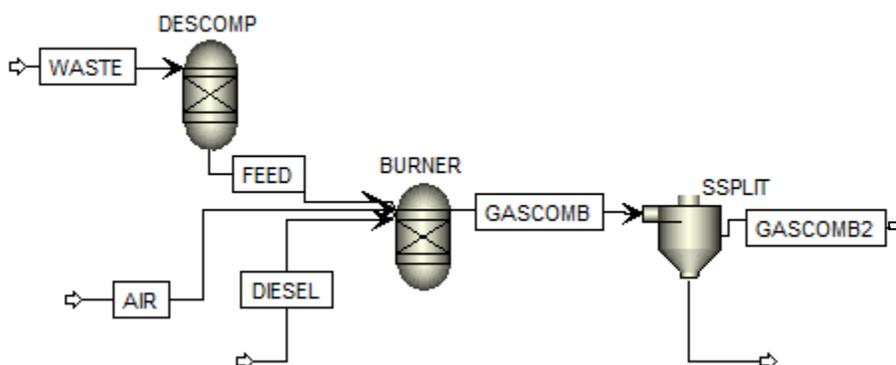
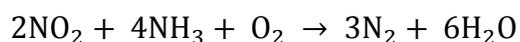
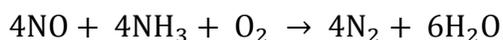


Figura 18. Captura de pantalla de la simulación de combustión de RP.

5.1.1.3 Limpieza y aprovechamiento de los gases

El tratamiento de los gases de combustión comprende un reactor (SNCR) localizado a la salida de la cámara de postcombustión, seguido de una caldera de recuperación y finalmente un lavador húmedo mediante absorción. El lavado de gases se simuló mediante reactores estequiométricos (RStoic), los cuales se utilizan cuando se conoce la estequiometría o fracción de conversión de las reacciones químicas que se llevan a cabo.

Se utilizó un reactor estequiométrico para simular el sistema de reducción selectiva no catalítica (SNCR) el cual realiza la reducción química de un contaminante por medio de un agente reductor, en este caso mediante amoníaco (NH_3), las reacciones que se lleva a cabo son las siguientes.



La razón estequiométrica normalizada (Normalized Stoichiometric Ratio, NSR) define la razón de reactivo requerida para alcanzar la meta de reducción de NO_x , en la práctica, se necesita más reactivo que la cantidad teórica para obtener un nivel específico de reducción de NO_x (Figura 19).

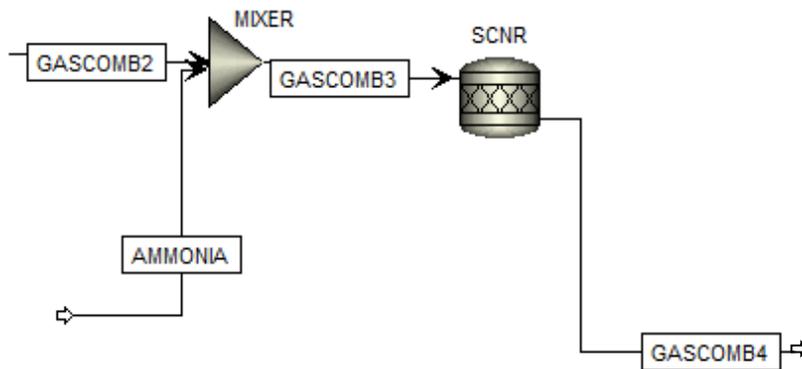


Figura 19. Captura de pantalla de la simulación del abatimiento de NOx.

Después de haber pasado por la reducción de NOx, el gas de combustión se transporta hacia la sección de recuperación de energía de la planta para la generación de vapor de alta presión (sobrecalentado), dicha sección está compuesta por una caldera de recuperación, la cual se simuló a través de una serie de tres intercambiadores, los cuales corresponden a un sobrecalentador, un evaporador, un domo y un economizador (Figura 20).

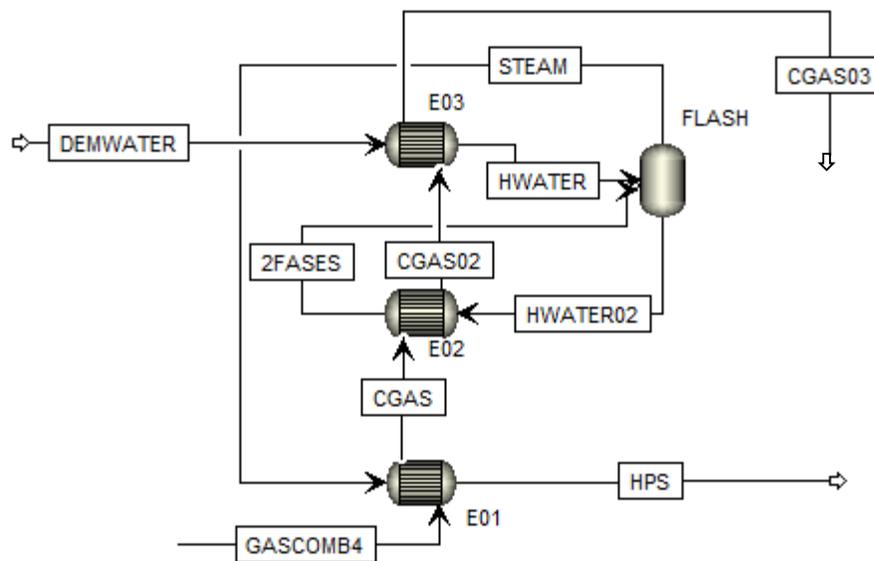
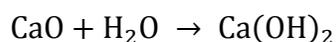
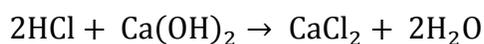
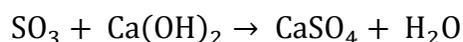
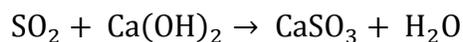


Figura 20. Captura de pantalla de la simulación de recuperación de energía y producción de vapor.

Una vez que se aprovechó el calor proveniente de los gases de combustión, el gas enfriado es alimentado a un reactor estequiométrico (RStoic) para simular la captura de gases ácidos mediante la absorción de óxidos de azufre, comúnmente llamados SOx y cloruro de hidrógeno (HCl) utilizando una solución de hidróxido de calcio Ca(OH)₂ comúnmente conocida como cal, resultando en la formación de sales a base de calcio. El uso de cal requiere la formación de la solución de hidróxido de calcio mediante la siguiente reacción.



El Ca(OH)₂ producido se mezcla con la corriente de gases, en donde reacciona con los componentes ácidos presentes en el mismo, las reacciones que se llevan a cabo en esta etapa se muestran a continuación.



En la Figura 21 se muestra una captura de pantalla en donde se observan los bloques utilizados en la simulación realizada.

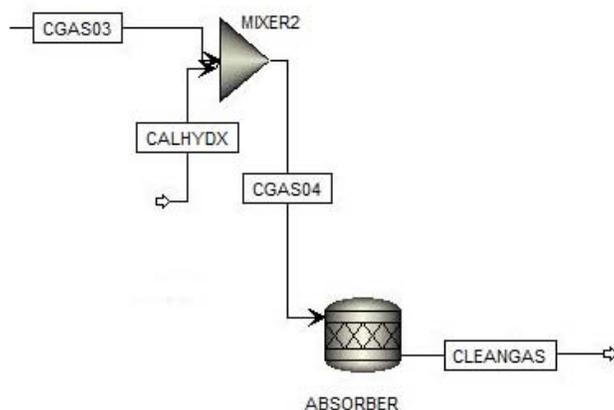


Figura 21. Captura de pantalla de la simulación del abatimiento de gases ácidos

Al finalizar la etapa de limpieza de los gases, el gas de combustión es enviado a la chimenea para su expulsión hacia la atmósfera.

A continuación se presenta un resumen con los modelos unitarios empleados en la simulación (Tabla 19), así como el diagrama del proceso de la simulación en Aspen Plus® (Figura 22).

Tabla 19. Descripción de bloques de Aspen Plus® utilizados en la simulación.

Fenómeno	Bloque	Nombre	Descripción
Separación de componentes	Ryield	DECOMP	Reactor no estequiométrico basado en la distribución de rendimiento.
Combustión de RP	RGibbs	BURNER	Reactor riguroso de equilibrio químico y de fases por minimización de la energía de Gibbs.
Separación de cenizas	Ssplit	SSPLIT	Separación de sólidos.
Abatimiento de NOx	RStoic	SNCR	Reactor estequiométrico basado en un fracción de conversión o extensión de la reacción.
Enfriamiento de gases / aprovechamiento de energía	Heater	E-01/E-02/E-03	Intercambio de calor.
Mezclador	Mixer	MIXER/MIXER2	Combinación de corrientes.
Abatimiento de gases ácidos	RStoic	ABSORBER	Reactor estequiométrico basado en un fracción de conversión o extensión de la reacción.

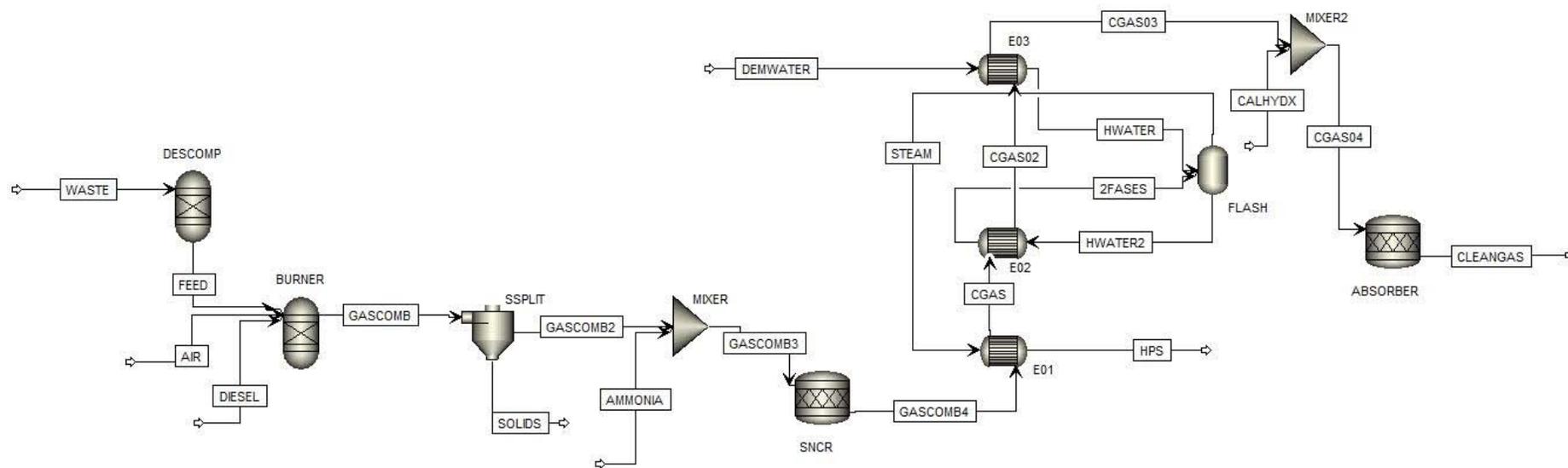


Figura 22. Simulación del proceso de incineración de RP en Aspen Plus®

5.1.2 Análisis de la viabilidad técnica-ambiental

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del proceso de incineración de RP realizado en Aspen Plus®, los cuales se compararán con las condiciones de operación y límites máximos permisibles de contaminantes hacia la atmósfera de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002 (Tabla 20).

Tabla 20. Composición y temperatura estimada por la simulación del proceso

	FEED	AIR	GASCOMB2	AMMONIA	GASCOMB4	CGAS03	CALHYDX	CLEANGAS
<i>Flujo másico kg/h</i>								
	4,500.00	28,850.40	33,135.13	50.00	33,185.13	33,185.13	960.00	34,145.13
Componentes convencionales								
H ₂ O	900.00	-	2,800.71	35.30	2,843.95	2,843.95	912.00	3,768.01
H ₂	198.00	-	-	-	-	-	-	-
N ₂	82.08	22,130.65	22,210.37	-	22,213.21	22,213.21	-	22,213.21
O ₂	1,248.44	6,719.75	1,423.32	-	1,422.51	1,422.51	-	1,422.51
NO	-	-	5.02	-	2.01	2.01	-	2.01
NO ₂	-	-	0.031	-	9.28E-03	9.28E-03	-	9.28E-03
SO ₂	-	-	21.44	-	21.44	21.44	-	1.07
SO ₃	-	-	0.62	-	0.62	0.62	-	0.03
Cl ₂	12.31	-	6.38E-04	-	6.38E-04	6.38E-04	-	6.38E-04
HCl	-	-	12.66	-	12.66	12.66	-	0.13
CO	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂	-	-	6,660.95	-	6,660.95	6,660.95	-	6,660.95
NH ₃	-	-	-	14.70	7.77	7.77	-	7.77
Ca(OH) ₂	-	-	-	-	-	-	48.00	11.16
Componentes sólidos convencionales								
S	10.98	-	trazas	-	-	-	-	-
C	1,722.24	-	trazas	-	-	-	-	-
CaSO ₃	-	-	-	-	-	-	-	38.20
CaSO ₄	-	-	-	-	-	-	-	0.99
CaCl ₂	-	-	-	-	-	-	-	19.08
Componentes sólidos no convencionales								
Cenizas	325.94	-	-	-	-	-	-	-
T °C	25.00	25.00	1,000.00	25.00	994.60	209.70	25.00	141.90

Fuente: Elaboración propia

El balance general del proceso se muestra en el Anexo 8.3.

5.1.2.1 Combustión de residuos

Para llevar a cabo la combustión completa de la materia orgánica en la corriente de alimentación, se inyectó una cantidad mayor de aire a la requerida estequiométricamente, esto se ve reflejado en la corriente resultante de gases de combustión en donde no hay presencia de monóxido de carbono y carbono, en cambio se presenta el exceso de oxígeno y dióxido de carbono producido en la combustión.

5.1.2.2 Temperatura

La temperatura de los gases derivados de la incineración de residuos se debe elevar hasta por lo menos 850 °C tras la última inyección de aire, en el caso de contener más del 1% de sustancias organocloradas, la temperatura deberá elevarse hasta 1100°C (SEMARNAT, 2004). De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación, la temperatura de los gases de combustión llega hasta 1,000 °C, correspondiente a la temperatura en la cámara de combustión secundaria, debido a que el sistema no considera la incineración de RP que contengan compuestos organoclorados, la temperatura alcanzada se encuentra dentro de los requerimientos marcados por la normatividad. Asimismo la temperatura a la salida de la chimenea es de 141.9°C lo cual está por debajo de lo establecido por la norma debido a que los gases no deben de rebasar 250 °C.

5.1.2.3 Recuperación de calor

Los gases de combustión procedentes del horno deben ser enfriados a 220 ° C o inferior en una caldera con el fin de aplicar la tecnología de tratamiento de gases de combustión disponible (The World Bank, 1999). Debido a lo anterior se implementó una caldera de recuperación donde se alimentó un flujo de 10,200 kg/h de agua desmineralizada, mediante la cual se logró bajar la temperatura de los gases de combustión hasta 209.7 °C, aprovechando esta energía en forma de calor para la

generación de 9,690 kg/h de vapor de alta presión debido a que se consideró un 5% de purgas en la caldera.

5.1.2.4 Limpieza de gases

Al finalizar el tratamiento de gases es necesario monitorear la composición de los contaminantes que serán emitidos a la atmósfera. Los límites de los contaminantes a comparar son CO, HCl, NO_x y SO₂ (Figura 23).

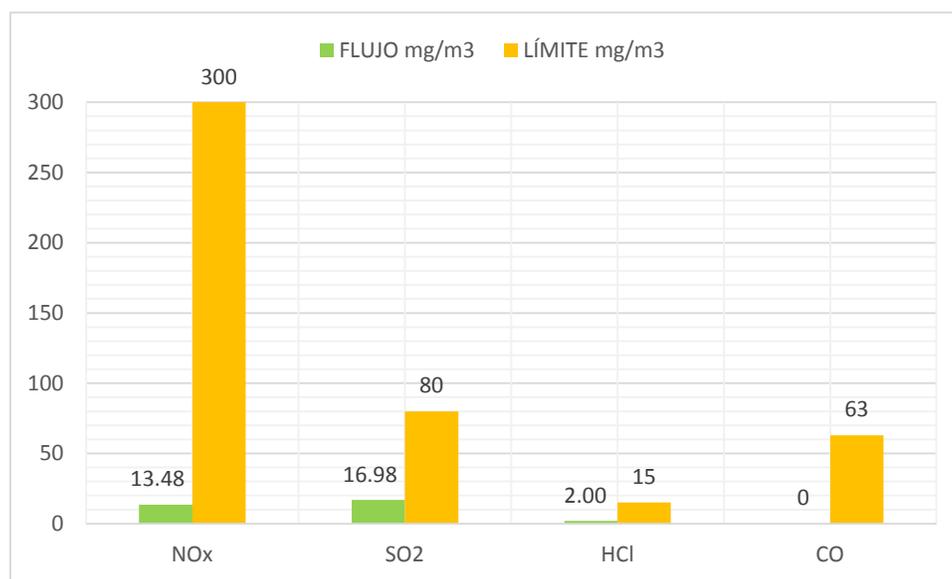


Figura 23. Comparación de emisiones con respecto a la NOM-098-SEMARNAT-2002.

Mediante el uso de tratamientos de limpieza se puede reducir la cantidad de contaminantes para lograr cumplir con los límites permisibles de emisión, la formación de éstos dependerán de la composición de alimentación de los RP.

De acuerdo a la Figura 23 se puede observar que los todos los contaminantes emitidos, se encuentran por debajo de los límites permisibles regulados por la NOM-098-SEMARNAT-2002, lo cual indica un proceso eficiente de combustión y tratamiento de gases. El proceso propuesto es técnica y ambientalmente viable debido a que cumple con los requerimientos mencionados en la normatividad.

5.2 Evaluación económica

En este apartado se desarrollan los elementos para la obtención de un estimado de inversión e indicadores de rentabilidad del proyecto (Clase IV).

El grado de desarrollo de ingeniería se asocia a diversas clasificaciones de estimado de costo, siendo la Clase IV correspondiente a un nivel de ingeniería conceptual, donde el grado de precisión estará en un intervalo de -20%/+35% de acuerdo a los lineamientos de PEMEX (PEMEX, 2013).

5.2.1 Estimación de los costos de inversión, operación y mantenimiento

Primeramente se estimó el costo de inversión de los equipos mayores mencionados en el caso de estudio, esto se realizó a partir de cotizaciones de equipos de capacidades o características similares, así como mediante el uso de publicaciones especializadas. En la Tabla 21 se muestra la lista de los equipos principales de la planta de incineración de RP, sus costos de inversión y las referencias de donde se obtuvieron dichos costos.

Para realizar el estimado de inversión directa se utilizó el método de porcentaje del costo de equipo (Peters, 2003). Este método requiere la determinación del costo del equipo mayor, mientras que los materiales auxiliares para la instalación y operación se obtuvieron de forma porcentual de acuerdo a datos referidos en bibliografía especializada. La metodología de cálculo de inversión se detalla en el Anexo 8.4.

A partir de dicha metodología se construyó la Tabla 22 en donde se muestra el resumen de los estimados de inversión directa del proyecto que se consideran para su análisis económico.

Tabla 21. Determinación de costos de inversión

TAG	Descripción	Costo	Fuente	Referencia
Equipo paquete				
IN-01	Incinerador	\$668,881	Cotización	Worlwide Recyling Equipment Sales
SC-01	Scrubber	\$34,625	Estimado	Aspen Plus
AR-01	Equipo paquete para la alimentación de RP	\$182,189	Cotización	Corporación de maquinaria, S.A.
Equipo dinámico				
BA-01	Bomba suministro de diésel	\$5,044	Cotización	Información estadística UPIIA
BA-02	Bomba suministro de solución de amoniaco	\$4,549	Estimado	Peters, 2003
BA-03	Bomba suministro de agua desmineralizada	\$10,859	Estimado	Peters, 2003
BA-04	Bomba suministro de solución de hidróxido de calcio	\$6,322	Estimado	Peters, 2003
BA-05	Bomba de achique de agua ácida	\$3,222	Estimado	Peters, 2003
BA-06	Bomba de agua ácida a disposición	\$3,222	Estimado	Peters, 2003
Tanques				
TH-01	Tanque de diésel	\$6,058	Estimado	Peters, 2003
TV-01	Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada	\$477,122	Estimado	Peters, 2003
TV-02	Tanque de almacenamiento de solución de amoniaco	\$32,581	Estimado	Peters, 2003
TV-03	Tanque de almacenamiento de solución de hidróxido de calcio	\$166,722	Estimado	Peters, 2003
TV-04	Tanque de almacenamiento de aguas ácidas	\$42,325	Cotización	Información estadística UPIIA
Equipo de recuperación de calor				
CH-01	Caldera de recuperación	\$245,114	Estimado	Towler, 2012
Equipo estático				
TC-01	Cárcamo de agua ácida	\$8,239	Estimado	Información estadística UPIIA

Nota (1): Costo de inversión en USD

Nota (2): Los estimados se actualizaron con Índices del Chemical Engineering Plant Cost Index

Tabla 22. Estimado de inversión para el proyecto

Partida	TAG	Equipo mayor	Cant	Gpo	Costo material	Costo de instalación	Importe total
1	IN-01	Incinerador	1	SIS	\$959,844	\$264,877	\$1,224,721
2	SC-01	Scrubber	1	SIS	\$49,686	\$13,711	\$63,398
3	AR-01	Equipo paquete para la alimentación de RP	1	MAQ	\$222,270	\$60,851	\$283,122
4	BA-01	Bomba suministro de diésel	1	EQD	\$8,625	\$3,107	\$11,732
5	BA-02	Bomba suministro de solución de amoniaco	1	EQD	\$7,779	\$2,802	\$10,582
6	BA-03	Bomba suministro de agua desmineralizada	1	EQD	\$18,569	\$6,689	\$25,258
7	BA-04	Bomba suministro de solución de hidróxido de calcio	1	EQD	\$10,811	\$3,894	\$14,705
8	BA-05	Bomba de achique de agua ácida	1	EQD	\$5,510	\$1,985	\$7,494
9	BA-06	Bomba de agua ácida a disposición	1	EQD	\$5,510	\$1,985	\$7,494
10	CH-01	Caldera de recuperación	1	HEX	\$427,724	\$163,614	\$591,337
11	TH-01	Tanque de diésel	1	TNK	\$12,329	\$5,219	\$17,548
12	TV-01	Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada	1	TNK	\$970,943	\$411,041	\$1,381,984
13	TV-02	Tanque de almacenamiento de solución de amoniaco	1	TNK	\$66,303	\$28,069	\$94,372
14	TV-03	Tanque de almacenamiento de solución de hidróxido de calcio	1	TNK	\$339,279	\$143,631	\$482,910
15	TV-04	Tanque de almacenamiento de aguas ácidas	1	TNK	\$86,132	\$36,463	\$122,596
16	TC-01	Cárcamo de agua acida	1	EST	\$9,764	\$1,520	\$11,284
Totales					\$3,201,078	\$1,149,459	\$4,350,537
Ingeniería y arranque (29%)							\$559,072
Contingencias (37%)							\$701,918
Capital de trabajo (15%)							\$990,270
Total del proyecto							\$6,601,797

El monto total de inversión estimada para la construcción de la planta de incineración es de **\$4,350,537 USD**, y de forma adicional se debe considerar un porcentaje agregado para el desarrollo de la Ingeniería y costos de arranque, que se consideraron en un 29% y un 37% como contingencia, a su vez se consideró un 15% del capital total de inversión para capital de trabajo. Con base en lo anterior, el

estimado total de inversión para la construcción de la planta de incineración asciende a **\$6,601,797 USD** y que al tipo de cambio USD/MXN de 14.80, corresponde a \$97,706,597 MXN.

5.2.2 Generación de flujo de efectivo

Para realizar la generación del flujo de efectivo, se tomaron en cuenta los costos de cada insumo requerido, los cuales se relacionaron con un balance de materia preliminar con el fin de identificar los beneficios directos. En la Figura 24 se muestra el balance de materia de las entradas y salidas del sistema incluyendo costos unitarios de cada una de las corrientes. En la Tabla 23 se presenta el resumen de los beneficios determinados en cada uno de los costos identificados para el proyecto, mostrando sus referencias en el Anexo 8.5.

Tabla 23. Costos y beneficios para el proyecto

COSTOS Y BENEFICIOS VARIABLES		Nota: Flujos de las variables económicas en base ANUAL			
BENEFICIOS	P. U.		P1	CONSUMO	
COMERCIALIZACIÓN POR LA DISPOSICIÓN	121.62	USD/ton	35,424	35,424	ton/a
VAPOR PRODUCIDO	17.93	USD/ton	76,280	76,280	ton/a
SERVICIOS AUXILIARES, ENERGÍA ELÉCTRICA Y COMBUSTIBLES			P1	CONSUMO	
AGUA DESMINERALIZADA	10.00	USD/m ³	80,295	80,295	ton/a
DIESEL	941.89	USD/m ³	35.42	35	m ³ / día
ENERGÍA ELÉCTRICA	0.19	USD/kW-h	1,007,616	1,007,616	kW/año
REACTIVOS Y TRATAMIENTOS			P1	CONSUMO	
AMONIACO	290.54	USD/ton	395	395	ton/a
HIDRÓXIDO DE CALCIO	74.57	USD/ton	7,556	7,556	ton/a
DISPOSICIÓN DE CENIZAS	121.62	USD/ton	7,085	7,085	ton/a
DISPOSICIÓN RECHAZO DE LAVADO	0.05	USD/m ³	545	545	ton/a
COSTOS FIJOS DE LA PLANTA (BASE ANUAL)					
COSTOS FIJOS DIRECTOS			P1	TOTALES	
Mantenimiento preventivo	5%		1,897,075	1,897,075	\$USD
Mano de Obra de Operación	Plantilla nueva		161,270	161,270	\$USD
Renta de Terreno	0			0	\$USD
COSTOS FIJOS INDIRECTOS			P1	TOTALES	
Gastos de Administración			\$142,662	142,662	
Seguros			56,912.26	56,912	
Depreciación	Lineal a 10 años		1,897,075	1,897,075	\$USD
INVERSIONES, REINVERSIONES Y CAPITAL DE TRABAJO					
			P1	TOTALES	
Inversiones del Proyecto			5,611,527	5,611,527	\$USD
Capital de Trabajo			989,082	989,082	\$USD

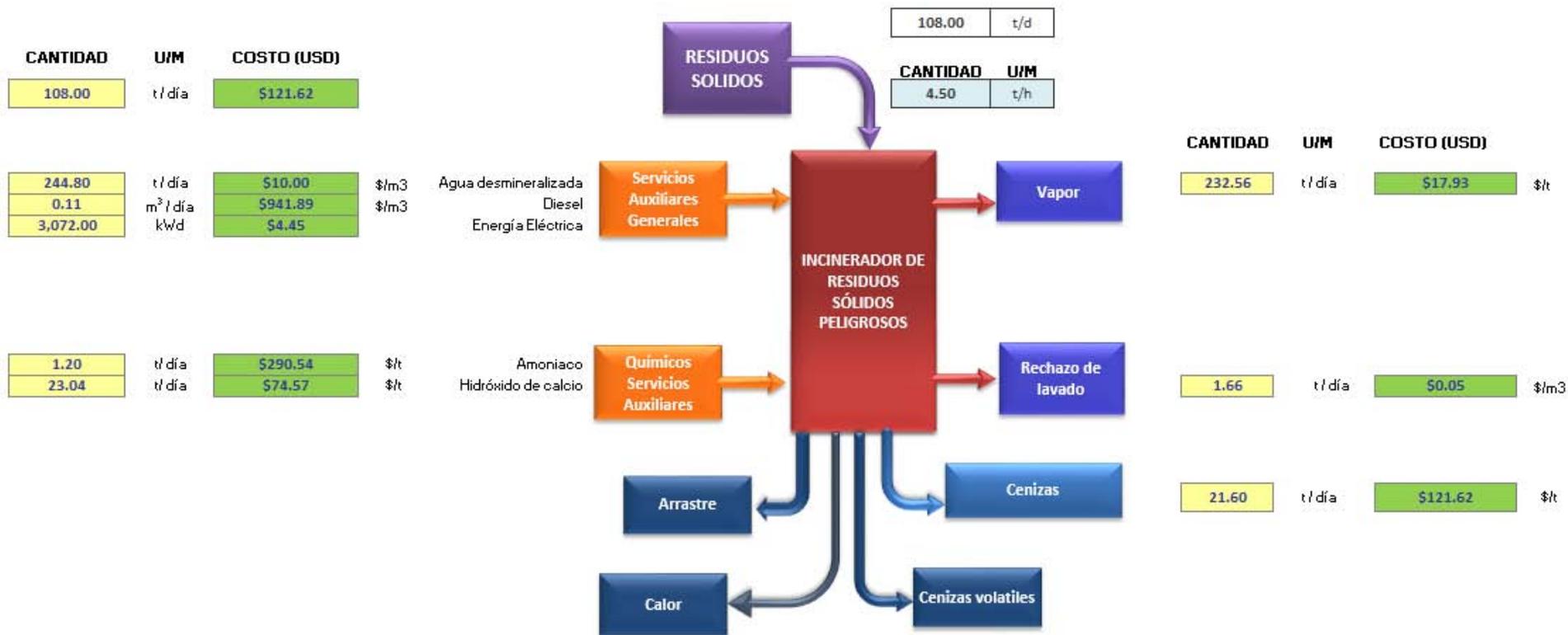


Figura 24. Balance de insumos, productos y servicios auxiliares

5.2.3 Cálculo de indicadores de rentabilidad

Con la información de inversiones, costos y beneficios de la operación de la planta de incineradora, los costos derivados del mantenimiento, así como los costos y gastos fijos de la planta, se realizó la evaluación económica a valor constante, obteniendo los indicadores de rentabilidad que se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Indicadores de rentabilidad del proyecto

Indicadores de la Propuesta	
Inversión Directa e Indirecta (USD\$)	5,611,527
Capital de Trabajo (USD\$)	989,082
Inversión Fija Total (USD\$)	6,600,609
Valor Presente Neto (USD\$)	3,156,933
Tasa Interna de Retorno	22.40%
Recuperación (años de operación)	4

En el Anexo 8.6 se muestra los Estados de Resultados Proforma en el horizonte de evaluación del proyecto, donde se muestran los costos variables, costos fijos, costos directos e indirectos con los flujos de efectivo descontados para la generación de los indicadores económicos mostrados en la Tabla 24.

5.2.4 Análisis de la viabilidad económica

Se desarrolló un análisis de sensibilidad, el cual se enfoca sobre las variables con mayor impacto en los indicadores económicos que son: Insumos, Inversión y de operación y mantenimiento; variando éstas en un intervalo de -20% a un 20%. En las Figura 25 y en la Figura 26 se muestra gráficamente el comportamiento de estas variaciones con respecto a la TIR y el VPN.

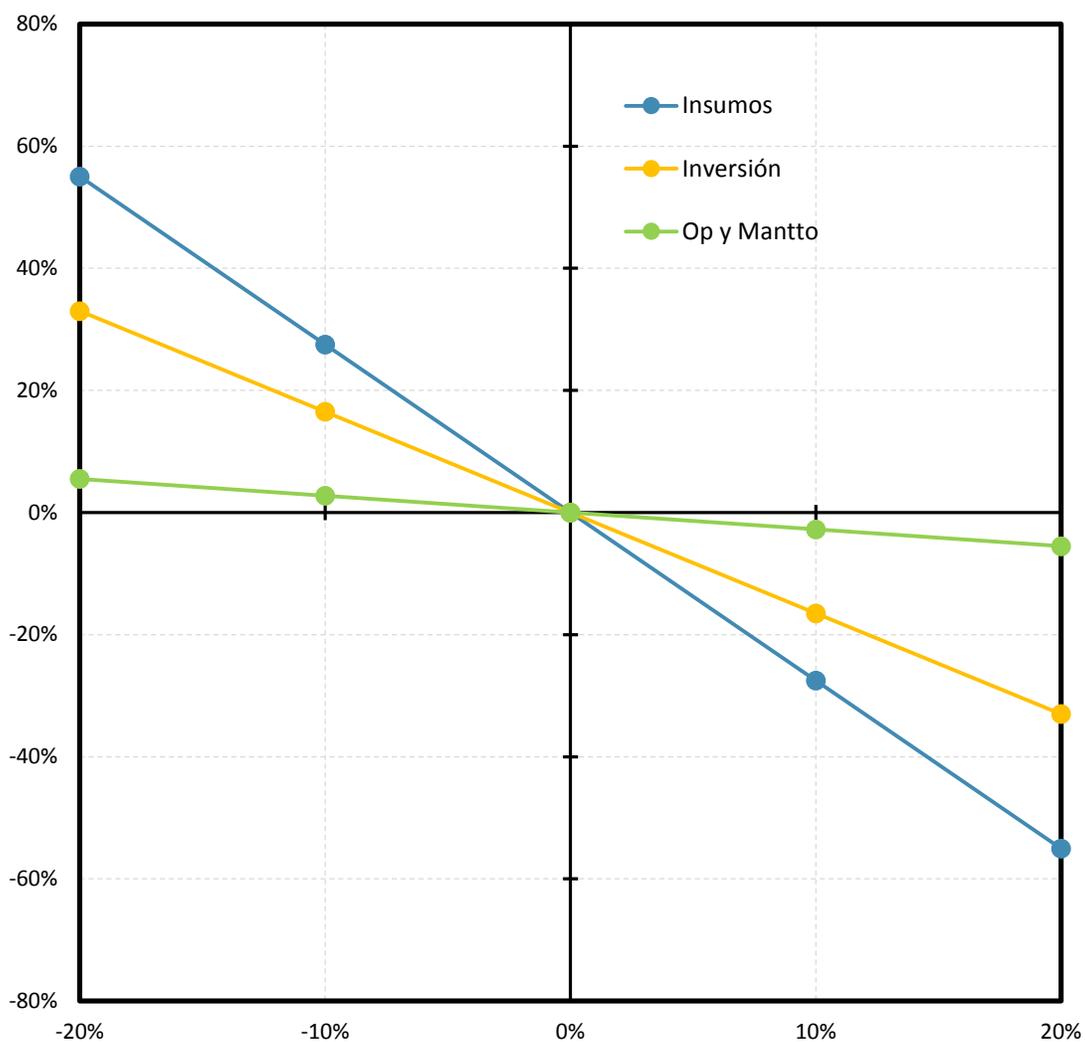


Figura 25. Análisis de sensibilidad para VPN

Tabla 25. Análisis de sensibilidad para VPN (USD)

	-20%	-10%	0%	10%	20%
Insumos	\$4,894,639	\$4,025,786	\$3,156,933	\$2,288,080	\$1,419,227
Inversión	\$4,198,985	\$3,677,959	\$3,156,933	\$2,635,907	\$2,114,881
Operación y Mantenimiento	\$3,330,592	\$3,243,762	\$3,156,933	\$3,070,103	\$2,983,274

Tabla 26. Análisis de sensibilidad para VPN (Porcentual)

	-20%	-10%	0%	10%	20%
Insumos	55.04%	27.52%	0.00%	-27.52%	-55.04%
Inversión	33.01%	16.50%	0.00%	-16.50%	-33.01%
Operación y Mantenimiento	5.50%	2.75%	0.00%	-2.75%	-5.50%

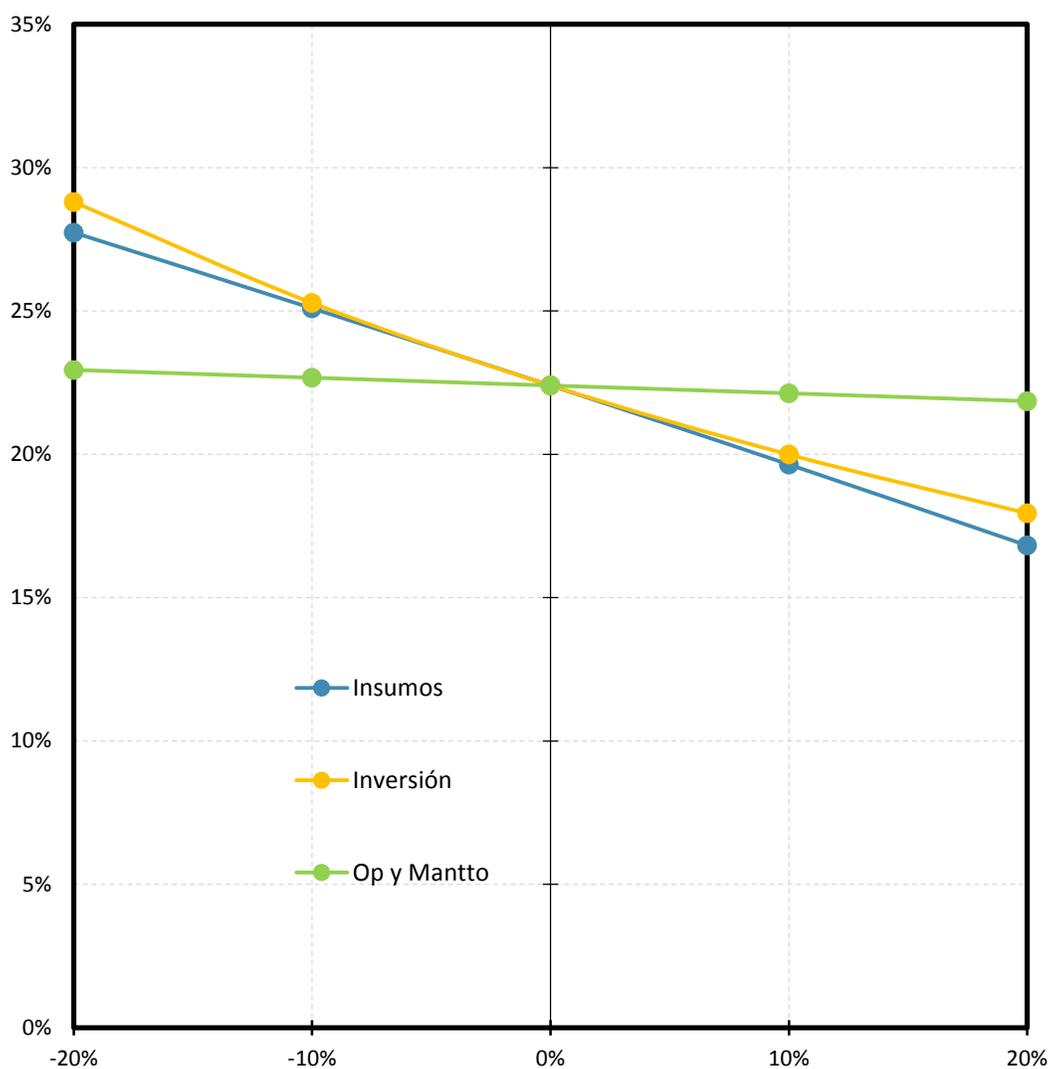


Figura 26. Análisis de sensibilidad para TIR

Tabla 27. Análisis de sensibilidad para TIR (porcentual)

	-20%	-10%	0%	10%	20%
Insumos	27.74%	25.09%	22.40%	19.65%	16.82%
Inversión	28.80%	25.28%	22.40%	19.99%	17.95%
Operación y Mantenimiento	22.94%	22.67%	22.40%	22.13%	21.86%

Derivado del análisis de sensibilidad para este proyecto, se puede observar que las variables que se deben de controlar principalmente son la inversión y los insumos, debido a producen el mayor efecto sobre ambos indicadores de rentabilidad (VPN y TIR), mientras que la operación y mantenimiento tiene un efecto de cambio poco variable sobre el proyecto.

Con respecto al indicador de VPN el parámetro más sensible es el de insumos y de la inversión, debido a que un aumento de estos se refleja en la disminución de hasta un 55% y un 33% del valor presente neto respectivamente. Sin embargo la rentabilidad del proyecto lo mantiene viable debido a que el VPN se mantiene positivo.

Para el análisis de sensibilidad para TIR, se puede observar que las variables de inversión e insumos se comportan similarmente y tienen el mayor impacto sobre éste indicador, sin embargo aun cuando se tenga un incremento de hasta un 20% ya sea en el monto de inversión o insumos, la TIR es mayor del 12% solicitado como premisa económica.

5.3 Consideraciones sociales

El alcance de este trabajo no involucra una evaluación social, sin embargo la implementación o rechazo de un programa o proyecto de inversión conllevan un impacto social, por lo que a continuación se enuncian algunas consideraciones y beneficios sociales derivadas de la implementación de un proyecto de incineración de RP en México, las cuales incluyen propuestas y líneas de acción del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.

- a) Lograr un manejo integral de residuos sólidos, de manejo especial y peligrosos, que incluya el aprovechamiento de los materiales que resulten y minimice los riesgos a la población y al medio ambiente.
- b) Es necesario dar a conocer información del proyecto para comprender el nivel de riesgo para la salud humana y para el ambiente el hecho de seguir disponiendo RP en tiraderos, el drenaje o buscando descalificar los residuos con base a la prueba CRETIB para así poder disponerlos en rellenos sanitarios o confinamiento a un menor costo.
- c) Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero.
- d) Promover la generación de empleos directos e indirectos al realizar una inversión para ampliar la cobertura de infraestructura y programas ambientales que protejan la salud pública y garanticen la conservación de los ecosistemas y recursos naturales.
- e) Es preferente que la localización de una planta de incineración a instalar se encuentre dentro de una zona o parque industrial lo cual beneficiaría el acceso de servicios y se tendría una mayor aceptación social.

6. CONCLUSIONES

La incineración es un proceso de destrucción de residuos peligrosos (RP) ampliamente utilizado a nivel internacional y en México. Para el caso particular de los residuos considerados en este estudio, el proceso de incineración es un método factible que representa una alternativa para la eliminación de los riesgos asociados a dichos residuos con una consecuente disminución del volumen original de los mismos, con la ventaja adicional de permitir una recuperación de energía dado el importante poder calorífico de los RP (3,608 kcal/kg).

La incineración es un proceso eficiente y limpio como método de tratamiento de RP debido a que los gases de combustión resultantes se someten a sistemas de limpieza avanzados asociados a altas demandas en el control y el mantenimiento del proceso, los cuales permiten el cumplimiento de la normatividad vigente como es el caso en México de la NOM-098-SEMARNAT-2002.

Después del análisis de las características de la planta piloto objeto del presente estudio, se identificaron áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia de operación, para disminuir las emisiones y para recuperar energía. Se propusieron modificaciones al sistema para el escalamiento del mismo las cuales incluyen:

- Se realizó una simulación del proceso con lo que se determinaron las condiciones de operación logrando la combustión completa de los RP con el fin de evitar la presencia de CO en la corriente de gases resultante.
- Se implementó una caldera de recuperación localizada a la salida de la segunda cámara de combustión para la recuperación de energía en forma de calor y generación de vapor.

Se utilizaron modelos para la combustión de los RP, recuperación de energía en forma de calor y limpieza de gases utilizando un software especializado para simular

el proceso de incineración de RP y el tratamiento de los gases en donde se obtuvieron las condiciones de operación. Se utilizó un reactor de equilibrio químico para simular el proceso de combustión, seguido de reactores estequiométricos para simular la reducción selectiva no catalítica (inyección de amoníaco) y el abatimiento de gases ácidos (inyección de hidróxido de calcio).

El modelo fue una herramienta útil para la evaluación y pronóstico de la eficiencia del sistema de limpieza de los gases, mediante la verificación de las emisiones de contaminantes, se determinó que éstas se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles marcados por la NOM-098-SEMARNAT-2002.

El proceso de incineración de RP simulado es técnica y ambientalmente viable, debido a que resultó eficiente y cumplió con las condiciones de operación especificadas por la normatividad, las cuales señalan como principales requerimientos, la temperatura de los gases en las cámaras de combustión, así como a la salida de la chimenea y los límites de emisión de contaminantes.

El proyecto de incineración de RP como tratamiento térmico de 28,188 t/a de RP (4.5 t/h), es económicamente viable. La inversión fija total del proyecto es de \$6,600,609 USD, en el horizonte de operación del estudio a 10 años, se espera que tenga un valor presente neto de \$3,156,933 USD. El proyecto tiene una tasa interna de retorno del 22.40%, con un período de recuperación de la inversión a 4 años.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management* (32), 625-639.
- Baca Urbina, G. (2001). *Evaluación de Proyectos* (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- Baca Urbina, G. (2007). *Fundamentos de Ingeniería Económica* (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- Brain, M. (2008). *How Steam Engines Work*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2014, de <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/steam2.htm>
- Brunner, C. R. (1993). *Hazardous Waste Incineration* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Cimini, S. (2005). Simulation of a waste incineration process with flue-gas cleaning and heat recovery sections using Aspen Plus. *Waste Management*, 25, 171-175.
- Cortinas , C., & Mosler, C. (2002). *Gestión de residuos peligrosos*. Programa Universitario de Medio Ambiente, UNAM.
- Couper, J. R., Hertz, D. W., & Lee Smith, F. (2008). *Perry's Chemical Engineer's Handbook. Section 9. Process Economics* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Delgadillo Hernández, N. A. (2012). *Estudio de prefactibilidad para la implementación de un sistema de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos con generación de energía para el Distrito Federal*. Tesis maestría, UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- FEECO International. (2014). *Rotary Kilns*. Obtenido de <http://feeco.com/rotary-kilns/>
- Ferandelh S.A. de C.V. (2014). *Cotización*.
- FIRA. (2011). Evaluación económica de Proyectos de Inversión. *FIRA Boletín de Educación Financiera*. México.
- Freeman, H. (1988). *Incinerating hazardous wasters*. Technomic Pub CO.

- Ganapathy, V. (1991). *Waste Heat Boiler Deskbook*. Prentice-Hall.
- Gobierno de la República. (s.f.). *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*.
- Hesketh, H. E., Cross Jr., F., & Tessitore, J. L. (1990). *Incineration for site cleanup and destruction of hazardous wastes*. Lancaster, Pennsylvania, U.S.A.: Technomic Publishing Company.
- Hitachi Zosen Inova AG. (2014). *The Inova fluid bed*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2014, de Proven standard in combustion technology: <http://www.hz-inova.com/cms/en/home/>
- ISWA. (2012). *Waste to Energy State of the Art Report*. Dinamarca: RAMBØLL Danmark A/S.
- Jannelli, E., & Minutillo, M. (2007). Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant. *Waste Management*, 27, 684-690.
- Klinghoffer, N., & Castaldi, M. (2013). *Waste to Energy Conversion Technology* (Primera ed.). Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- LaGrega, D. M. (2001). *Hazardous Waste Management* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- LGEEPA. (2012). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: Diario Oficial de la Federación del 4 de junio de 2012.
- LGPGIR. (2014). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México: Diario Oficial de la Federación del 19 de marzo de 2014.
- Loh, H., & Lyons, J. (2002). *Process Equipment Cost Estimation*. Technical Report, National Energy Technology Center, US.
- Ma, P., & Ma, Z. (2011). Industrial hazardous waste treatment featuring a rotary kiln and grate furnace incinerator: a case study in China. *Waste Management & Research*, 29, 1108-1112.
- MARTIN GmbH. (2012). *NOx reduction*. Obtenido de <http://www.martingmbh.de/en/overview.html>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Informe del estado del medio ambiente. Gobierno de Chile.
- Niessen, W. R. (2002). *Combustion and Incineration Processes* (Third ed.). New York: Marcel Dekker, Inc.

- Pavlas, M. (2009). Waste to energy e An evaluation of the environmental impact. *Applied Thermal Engineering*, 30, 2326-2332.
- PEMEX. (2013). *Sistema Institucional de Desarrollo de Proyectos* (Vol. 4).
- PEMEX. (2014). *Indicadores Petroleros. Precio al público de productos petrolíferos*.
- Peters, M. S. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. U.S.: McGraw-Hill.
- Phongphiphat, A. (2011). Ash deposit characterisation in a large-scale municipal waste-to-energy incineration plant. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 218-226.
- Pichtel, J. (2005). *Waste management practices : municipal, hazardous, and industrial*. New York: Taylor & Francis.
- PMI Standards Committee. (1996). *A guide to the project management body of knowledge. (PMBOK® guide)*. Project Management Institute.
- Rickman, W. S. (1990). *CRC Handbook of Incineration of Hazardous Wastes*. USA: CRC Press, Inc.
- Rivera Villa, C. (2003). *Metodología para la selección, dimensionamiento y especificación de un sistema de incineración con recuperación de energía para el tratamiento de residuos líquidos generados en la refinación del petróleo*. Tesis maestría, UNAM, Facultad de ingeniería, México, D.F.
- Rodríguez Jiménez, J. J. (1999). *Los residuos peligrosos: caracterización, tratamiento y gestión*. Editorial Síntesis.
- Rosas Domínguez, A. (2003). Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. *Gaceta Ecológica*(66), 27-40.
- Sainz, R., & Magaña, J. (2007). Método para realizar un análisis de sensibilidad a proyectos de inversión, ante cambios en la tasa de interés. *Revista Voces: Tecnología y pensamiento*.
- Secretaría de Finanzas. (2013). *Formulación y evaluación de proyectos de inversión pública. Guía básica*. Banco de Programas y Proyectos de Inversión Pública, México.

- SEMARNAT. (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes*. México: Diario Oficial de la Federación del 1 de octubre de 2004.
- SEMARNAT. (2005). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. indicadores clave y de desempeño ambiental. México.
- SEMARNAT. (2006). *Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos*. México: Diario Oficial de la Federación del 23 de junio de 2006.
- SEMARNAT. (2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. México: Diario Oficial de la Federación del 2 de febrero de 2012.
- SEMARNAT. (2014). Estimación de residuos peligrosos a generar, por tipo de residuo, indicado por empresas registradas en el Padrón de Generadores de la SEMARNAT. México.
- SENER. (2009). *Recuperación de calor de proceso*. Obtenido de Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE).
- SHCP. (Agosto de 2012). *Parámetros de estimación de vida útil*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación.
- SHCP. (Diciembre de 2013). *Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación.
- Soler & Palau. (2013). *Casos de aplicación: Depuración del aire. Filtros II*. Obtenido de <http://www.soler-palau.mx/>
- Stanmore, B. R. (2004). The formation of dioxins in combustion systems. *Combustion and Flame* (136), 398-427.

- Tayyeb , J. M. (2007). Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction. *Journal of Environmental Management*, 83, 251-289.
- Tchobanoglous, G. (1993). *Integrated Solid Waste Management* (International ed.). McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (Second ed.). N.Y.: McGraw-Hill.
- The World Bank. (1999). World Bank Technical Guidance Report. Municipal Solid Waste Incineration. Washington, D.C., U.S.A.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2012). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- U.S. EPA. (2011). Hazardous Waste Combustion. *RCRA Orientation Manual 2011: Resource Conservation and Recovery Act*. U.S.A.
- U.S. EPA. (s.f.). Hoja de Datos- Tecnología de Control de la Contaminación del Aire. *Reducción Selectiva No Catalítica (SNCR)*. U.S.A.
- UPIIA. (2012). *Plan de manejo para los residuos sólidos impregnados con hidrocarburos (peligrosos), en cada una de las seis refinerías del Sistema Nacional*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Vehlow, J. (2014). Air pollution control systems in WtE units: An overview. *Waste Management*, Article in press.
- Waldner, M. H. (2013). Energy from Waste – Clean, efficient, renewable: Transitions in combustion efficiency and NOx control. *Waste Management*, 33, 317-326.
- Zandaryaa, S. (2001). Nitrogen oxides from waste incineration: control by selective non-catalytic reduction. *Chemosphere*, 42, 491-497.

8. ANEXOS

8.1 Características que definen a un residuo como peligroso

El residuo es peligroso si presenta al menos una de las siguientes características, bajo las condiciones señaladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

- Corrosividad
- Reactividad
- Explosividad
- Toxicidad Ambiental
- Inflamabilidad
- Biológico-Infeciosa

Es Corrosivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido acuoso y presenta un PH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5 de conformidad con el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- Es un sólido que cuando se mezcla con agua destilada presenta un PH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5 según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- Es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6,35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55°C), según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

Es Reactivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

- Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- Es un residuo que en contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg de ácido cianhídrico por kg de residuo o 500 mg de ácido sulfhídrico por kg de residuo, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

Es Explosivo cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía o si es calentado bajo confinamiento. Esta característica no debe determinarse mediante análisis de laboratorio, por lo que la identificación de esta característica debe estar basada en el conocimiento del origen o composición del residuo.

Es Tóxico Ambiental cuando:

- El extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053-SEMARNAT-1993, contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de esta Norma en una concentración mayor a los límites ahí señalados, la cual deberá obtenerse según los procedimientos que se establecen en las Normas Mexicanas correspondientes.

Es Inflamable cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60,5°C, medido en

copa cerrada, de conformidad con el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente, quedando excluidas las soluciones acuosas que contengan un porcentaje de alcohol, en volumen, menor a 24%.

- No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25°C, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- Es un gas que, a 20°C y una presión de 101,3 kPa, arde cuando se encuentra en una mezcla del 13% o menos por volumen de aire, o tiene un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.
- Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material.

Es Biológico-Infecioso de conformidad con lo que se establece en la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, referida a la Protección ambiental-Salud ambiental-Residuos peligrosos biológico-infecciosos-Clasificación y especificaciones de manejo.

8.2 Incineradores autorizados por la SEMARNAT

Tabla 28. Distribución de incineradores de residuos peligrosos en México por entidad federativa

Entidad federativa	RP	RPBI	Incinerador cementero	TOTAL
Aguascalientes			1	1
Guanajuato		1		1
Hidalgo	1		5	6
Jalisco	1	1	2	4
Nayarit				0
Querétaro				0
San Luis Potosí			3	3
Zacatecas				0
Colima		1	1	2
Estado de México	2	4	2	8
Guerrero			1	1
Michoacán				0
Morelos			2	2
Puebla		1	1	2
Tlaxcala	1			1
Veracruz	1		1	2
ZMCM				0
Baja California	1		1	2
Baja California Sur				0
Chihuahua			3	3
Coahuila		1	2	3
Durango				0
Nuevo León	1	2	2	5
Sinaloa				0
Sonora			2	2
Tamaulipas	2	1		3
Campeche				0
Chiapas				0
Oaxaca			1	1
Quintana Roo				0
Tabasco			1	1
Yucatán		1	1	2
Total	10	13	32	55

8.3 Balance de materia

Línea	Nombre	Flujo kg/h	Temperatura °C	Presión kg/cm ²
1	Alimentación de RP	4,500.00	25.00	0.81
2	Suministro de aire	28,850.40	25.00	0.81
3	Suministro de combustible	110.68	25.00	0.81
4	Gases de combustión	33,135.13	1,000.00	0.65
5	Cenizas	325.94	1,000.00	0.65
6	Suministro de amoniaco	50.00	25.00	0.81
7	Gases de combustión2	33,185.13	994.60	0.81
8	Agua desmineralizada	10,200.00	100.00	39.23
9	Gas enfriado	33,185.13	209.70	0.81
10	Vapor generado	9,690.00	500.00	39.23
11	Suministro de hidróxido de calcio	960.00	25.00	0.81
12	Gas limpio	34,145.13	201.90	0.80
13	Rechazo de lavado de gas	69.44	75.00	0.80
14	Gas salida de chimenea	34,145.13	141.90	0.80
15	De TH-01 a BA-01	138.35	25.00	0.81
16	Recirculación bomba BA-01	27.67	25.00	0.81
17	De TV-02 a BA-02	62.50	25.00	0.81
18	Recirculación bomba BA-02	12.50	25.00	0.81
19	De TV-01 a BA-03	12,750.00	100.00	39.23
20	Recirculación bomba BA-03	2,550.00	100.00	39.23
21	De TV-03 a BA-04	1,200.00	25.00	0.80
22	Recirculación bomba BA-04	240.00	25.00	0.80
23	De TC-01 a TV-04	69.44	75.80	0.66
24	De TC-01 a BA-05	86.80	75.80	0.66
25	Recirculación bomba BA-05	17.36	75.80	0.66
26	A tratamiento de agua	69.44	75.80	0.66
27	De TV-04 a BA-06	86.80	75.80	0.66
28	Recirculación bomba BA-06	17.36	75.80	0.66

8.4 Metodología de cálculo de costos de inversión

Para realizar la estimación de la inversión directa se tomaron en cuenta los trabajos relacionados de aquellos equipos que conforman la operación principal de las plantas de proceso y se agruparon en seis grupos de equipos: Dinámicos (EQD), Estáticos (EST), Tanques y Columnas (TNK), de Transferencia Térmica (HEX), Maquinarias de Proceso (MAQ) y Sistemas o Equipos paquete (SIS) como se muestra en la Figura 27.

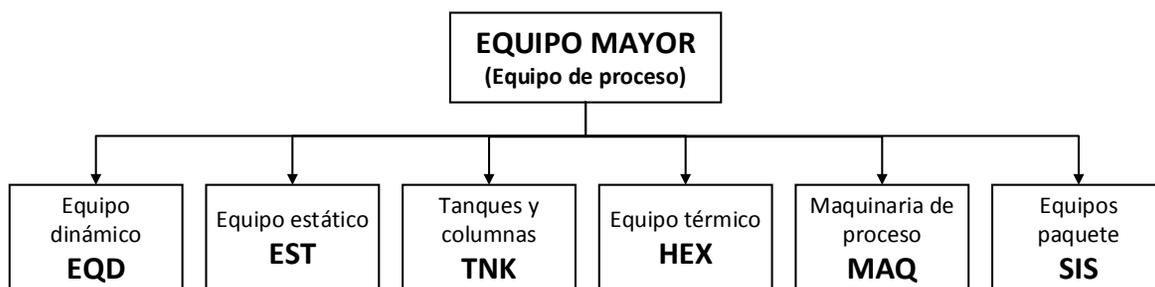


Figura 27. Esquema de equipos mayores y sus grupos de clasificación.

Adicionalmente, se consideraron los equipos y materiales auxiliares para la instalación completa y la adecuada operación de los equipos mayores, como se muestra en la Figura 28.

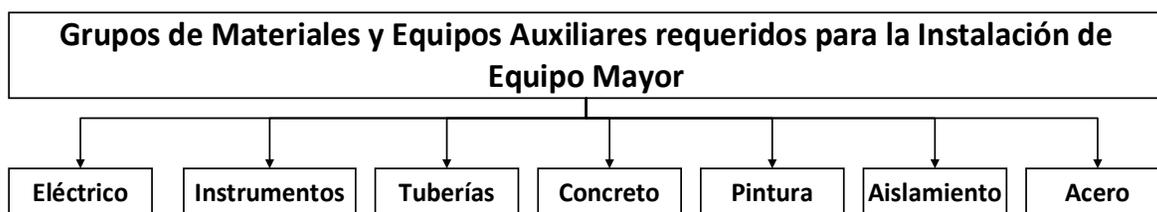


Figura 28. Esquema de materiales y equipos auxiliares de instalación.

Una vez establecidas estas medidas, se desarrolló el estimado de inversión para el proyecto de la planta de incineración de RP utilizando la Tabla 21 con la lista de equipos mayores, únicamente se considera como alcance el suministro de equipo nuevo, la cual sigue la metodología indicada en la Figura 29

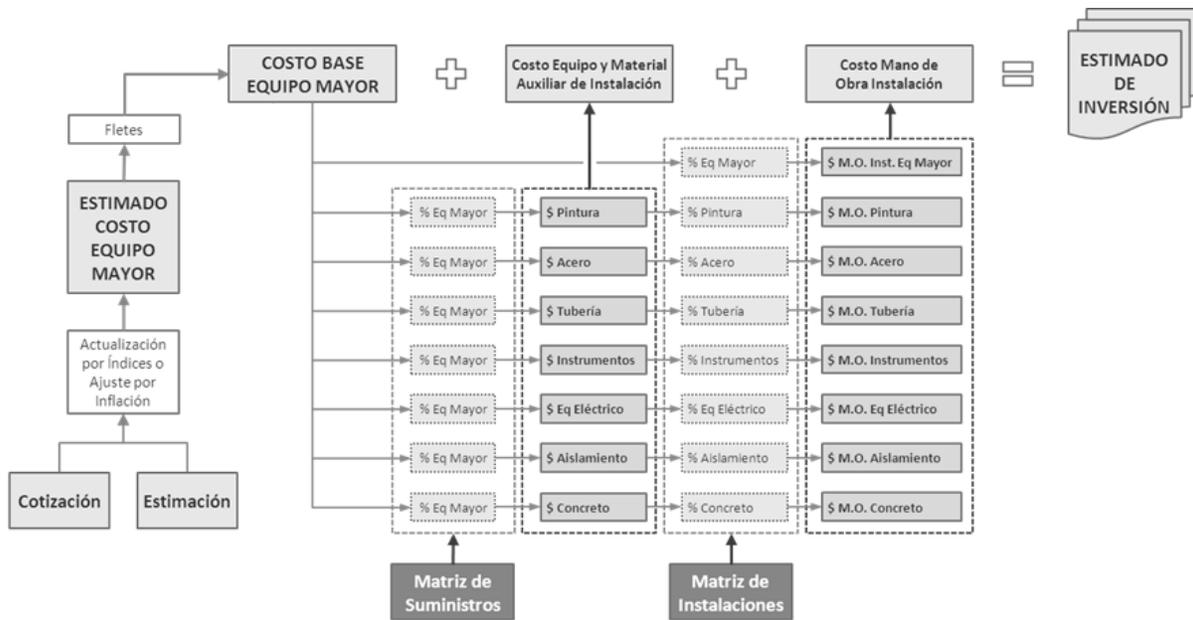


Figura 29. Metodología general para la estimación del costo directo de inversión

Como primer paso se le asignó un alcance general para cada equipo (Nuevo), una vez ordenados cada equipo en los grupos asignados (EQD, EST, TNK, HEX, MAQ, SIS) se obtuvo el costo de cada uno de ellos por medio de cotizaciones, gráficas, bases de datos publicados, entre otros. Se actualizaron los costos mediante el uso de Índices del Chemical Engineering Plant Cost Index (Figura 30) y con ello se obtuvieron los costos base.

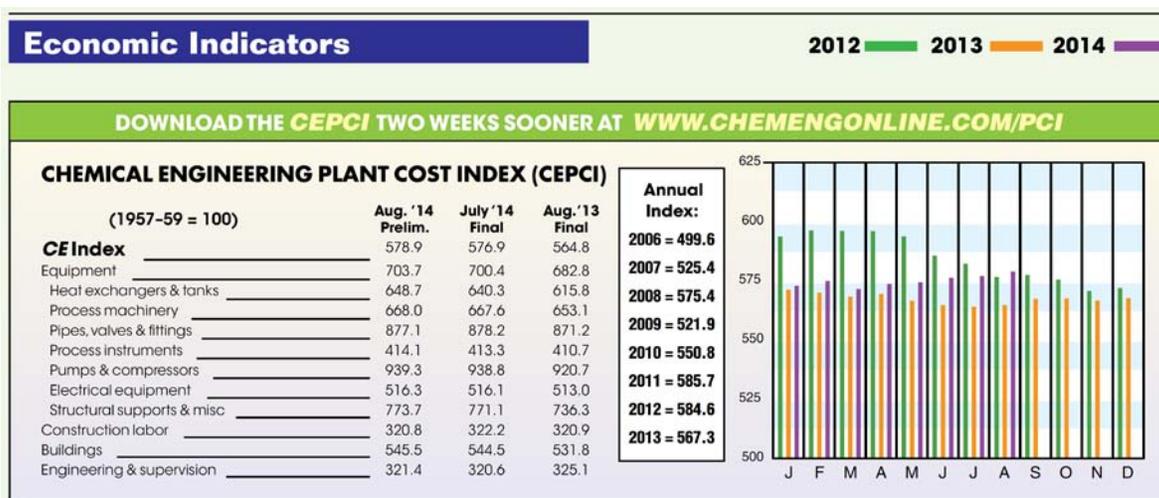


Figura 30. Indicadores económicos del Chemical Engineering.

Para la obtención del estimado preliminar para la instalación de equipo mayor se aplicaron factores de costos por grupo de equipo y por costo de instalación para determinar costos de materiales y equipos auxiliares. Se incluyen dentro de los costos de inversión los correspondientes al mejoramiento de suelo, así como los necesarios para el desarrollo de la ingeniería y arranque de la planta, el costo de los equipos se considera libre a bordo (f.o.b.) debido a que no se incluye el costo del flete o traslado de los equipos hasta el lugar deseado.

Lo anterior dio como resultado el estimado directo de inversión de la planta de incineración de RP. Se incluye un porcentaje adicional del 37% como contingencia general del proyecto y un 15% del total de inversión como capital de trabajo.

Una vez establecido el costo base para cada uno de los equipos mayores, dicho costo es afectado por factores relacionados con el suministro de materiales y equipo auxiliar, así como por factores que toman en cuenta los costos por instalación de los equipos mayores, los equipos auxiliares y los restantes materiales (Figura 28). Ambos factores, de suministro (f_{SM}) e instalación (f_{IM}), toman en cuenta el grupo de equipo mayor considerado en el costo base, generando una Matriz de Suministros (Tabla 29) y una Matriz de Instalaciones para los equipos y materiales utilizados (Tabla 30).

En primer término, el costo preliminar se modifica por un factor de alcance para el suministro de los equipos y materiales (f_{AM}) y posteriormente, por un factor de alcance que modifica el monto de la instalación (f_{AI}).

Finalmente, se agrega un costo porcentual sobre el costo base y que está relacionado con trabajos adicionales de mejoramiento de suelo (f_d), de acuerdo al desglose del alcance general del equipo mayor para integrar el equipo nuevo.

El proceso completo se establece mediante la Ecuación (4):

$$CIP_k = CB_k \cdot f_{SM} \cdot f_{IM} \cdot f_{AM} \cdot f_{AI} + CB \cdot f_d$$

Ecuación (4)

En donde:

- CIP_k , costo integral de trabajos relacionados con el equipo mayor k .
- CB_k , costo base del equipo mayor k .
- f_{SM} , factor de costo por el suministro de materiales y equipo auxiliar.
- f_{IM} , factor de costo por la instalación de equipos y materiales.
- f_d , factor por mejoramiento de sitio.

Los correspondientes valores de factores por suministro de equipo y materiales y de instalación, se muestran a continuación en la Tabla 29 y Tabla 30.

Tabla 29. Matriz de suministros.

Familia equipo mayor	Eq mayor	Eléctrico	Instrum.	Tubería	Concreto	Pintura	Aislam.	Acero
EQD	100%	30.0%	3.0%	30.0%	4.0%	1.0%	3.0%	0.0%
EST	100%	8.0%	3.0%	4.0%	3.0%	0.5%	0.0%	3.0%
TNK	100%	5.0%	11.0%	60.0%	10.0%	1.5%	8.0%	8.0%
HEX	100%	1.0%	10.0%	45.0%	5.0%	0.5%	10.0%	3.0%
MAQ	100%	1.0%	4.0%	14.0%	2.0%	1.0%	0.0%	0.0%
SIS	100%	5.0%	5.0%	25.0%	7.0%	1.0%	0.5%	0.0%

Tabla 30. Matriz de instalaciones para los equipos y materiales utilizados.

Familia equipo mayor	Eq mayor	Eléctrico	Instrum.	Tubería	Concreto	Pintura	Aislam.	Acero
EQD	20.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%
EST	5.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%
TNK	20.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%
HEX	20.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%
MAQ	20.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%
SIS	15.0%	50.0%	70.0%	70.0%	70.0%	90.0%	60.0%	60.0%

8.5 Referencias costos de servicios auxiliares

Tabla 31. Referencias costos y beneficios para el proyecto

Servicio	Unidad	PU MXN	PU USD	Referencia
Costo disposición residuos peligrosos	t	MXP 1,800.00	USD 121.62	UPIIA, 2012
Vapor de alta 42 bar	t	MXP 265.43	USD 17.93	UPIIA, 2012
Diésel	m ³	MXP 13,940.00	USD 941.89	PEMEX, 2014
Energía eléctrica	kW-h	MXP 2.74	USD 0.19	CFE, 2014
Amoniaco	t	MXP 4,300.00	USD 290.54	Ferandelh S.A. de C.V.
Hidróxido de calcio	t	MXP 1,103.60	USD 74.57	Ferandelh S.A. de C.V.
Costo disposición cenizas	t	MXP 1,800.00	USD 121.62	UPIIA, 2012
Costo disposición rechazo de lavado	m ³	MXP 0.74	USD 0.05	UPIIA, 2012

8.6 Estado de resultados proforma

Tabla 32. Estado de resultados proforma

Año		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Horizonte de evaluación		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% Operación		0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
BALANCE DE MATERIA												
PRODUCTOS												
Comercialización por la disposición	ton/a	0	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424	35,424
Vapor producido	ton/a	0	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280	76,280
SERVICIOS AUXILIARES, ENERGÍA ELÉCTRICA Y COMBUSTIBLES												
Agua desmineralizada	ton/a	0	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295	80,295
Diésel	m3 / día	0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Energía eléctrica	kW/año	0	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616	1,007,616
QUÍMICOS, REACTIVOS Y CATALIZADORES												
Amoniaco	ton/a	0	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395
Hidróxido de calcio	ton/a	0	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556	7,556
Disposición de cenizas	ton/a	0	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085	7,085
Disposición rechazo de lavado	ton/a	0	545	545	545	545	545	545	545	545	545	545
PRECIOS (\$USD)												
PRODUCTOS												
Comercialización por la disposición	USD/ton	-	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62
Vapor producido	USD/ton	-	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93	17.93
COSTOS DE OPERACIÓN												
Agua desmineralizada	USD/m3	-	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Diésel	USD/m3	-	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89	941.89
Energía eléctrica	USD/kW-h	-	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
QUÍMICOS Y REACTIVOS												
Amoniaco	USD/ton	-	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54	290.54
Hidróxido De Calcio	USD/ton	-	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57	74.57
Disposición de cenizas	USD/ton	-	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62	121.62
Disposición rechazo de lavado	USD/m3	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabla 33. Estado de resultados proforma (continuación)

IMPORTES ANUALES (\$USD)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Consecutivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Horizonte de evaluación	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

INGRESOS, AHORROS Y BENEFICIOS (\$USD ANUALES)											
Comercialización por la disposición	-	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324	4,308,324
Vapor producido	-	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070	1,368,070
BENEFICIO TOTAL ANUAL	-	5,676,394									

COSTOS VARIABLES DE PRODUCCIÓN (USD\$ ANUALES)											
COSTOS DE OPERACIÓN											
Agua desmineralizada	-	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952	802,952
Diésel	-	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366	33,366
Energía eléctrica	-	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749	186,749
Costo Anual de Materias Primas	-	1,023,067									
COSTO QUÍMICOS Y REACTIVOS											
Amoniaco	-	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700	114,700
Hidróxido de calcio	-	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428	563,428
Disposición de cenizas	-	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665	861,665
Disposición rechazo de lavado	-	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Costos Anuales de Químicos y Reactivos	-	1,539,820									
TOTAL COSTOS VARIABLES DE PRODUCCIÓN	-	2,562,887									

Tabla 34. Estado de resultados proforma (continuación)

IMPORTES ANUALES (\$USD)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Consecutivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Horizonte de evaluación	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
COSTOS FIJOS DE LA PLANTA (\$USD)											
Costos Fijos Directos											
Mantenimiento preventivo 5%	-	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854	94,854
Mano de Obra de Operación	-	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270	161,270
Renta de Terreno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Costos Fijos Directos	-	256,124									
Costos Fijos Indirectos											
Gastos de Administración	-	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662	142,662
Seguros	-	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912	56,912
Depreciación	-	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708
Total Costos Fijos Indirectos sin Depreciación		199,574									
Total Costos Fijos Indirectos con Depreciación		389,282									
BALANCE DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS (\$USD)											
Ingreso Total Anual	-	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394	5,676,394
Costo Total en Efectivo de Operación	-	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011	2,819,011
Costo Total de Operación	-	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293	3,208,293
Utilidades antes de Impuestos	-	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101	2,468,101
Impuestos 40%	-	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241	987,241
Utilidades después de Impuestos	-	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861	1,480,861
Inversiones Totales y Capital de Trabajo	6,600,609	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(989,082)
Depreciación	-	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708	189,708
Flujo de efectivo después de impuestos	(6,600,609)	1,670,568	2,659,650								
Flujo de efectivo antes de impuestos	(6,600,609)	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	2,657,809	3,646,891