



**METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
TÉRMICO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA
ACTIVIDAD HIDROCARBURÍFERA EN LA PROVINCIA NEUQUÉN,
ARGENTINA**

Paola Andrea Prada



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
Córdoba - Argentina
2016



**METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
TÉRMICO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA
ACTIVIDAD HIDROCARBURÍFERA EN LA PROVINCIA DE NEUQUÉN,
ARGENTINA**

Paola Andrea Prada

**Tesis para obtener el título de
Máster en Ciencias de la Ingeniería Mención Ambiente**

**Director
Dr. Santiago María Reyna**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
Córdoba - Argentina
2016**



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	v
1. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Problema de Investigación.....	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General.....	1
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Metodología	2
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Generalidades de la Industria Hidrocarburífera	4
2.1.1. Prospección y Exploración.....	4
2.1.2. Explotación.....	5
2.1.3. Transporte	7
2.1.4. Refinación.....	7
2.1.5. Almacenamiento	8
2.1.6. Comercialización.....	8
2.2. Impactos Ambientales Generados en la Actividad Hidrocarburífera	8
2.3. Residuos Sólidos Generados en la Industria Hidrocarburífera	10
2.3.1. Definiciones de Residuo	10
2.3.2. Clasificación de Residuos.....	11
2.3.3. Residuos Peligrosos	11
2.4. Tecnologías de Tratamiento	13
2.4.1. Tratamiento térmico	16
2.4.1.1. Incineración.....	19
2.4.1.2. Pirólisis	22
2.4.1.3. Gasificación	23
2.4.1.4. Gasificación por plasma.....	25
2.4.1.5. Coprocesado.....	27
2.4.1.6. Microondas	28



2.4.1.7. Vitrificación.....	29
2.4.2. Aplicabilidad de los Sistemas Térmicos para el Tratamiento de Residuos Peligrosos Generados en la Industria Hidrocarburífera.....	29
2.4.3. Aspectos Técnicos, Ambientales, Económicos y Sociales de los Sistemas de Tratamiento Térmico.....	30
2.4.3.1. Aspecto Ambiental.....	31
2.4.3.2. Aspecto Económico.....	41
2.4.3.3. Aspecto Social.....	47
3. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA.....	48
3.1. Proceso de Toma de Decisiones.....	48
3.2. Análisis de Decisión Multicriterio.....	48
3.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process).....	50
3.3.1. Base Matemática del AHP.....	50
3.3.2. Esquema Metodológico del AHP.....	55
3.3.2.1. Estructuración del Modelo Jerárquico.....	55
4. APLICACIÓN DEL METODO AHP EN LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO TERMICO DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA ACTIVIDAD HIDROCARBURÍFERA DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN.....	59
4.1. Descripción del Área de Estudio.....	59
Descripción del Predio Ubicado en el Parque Industrial Senillosa.....	63
4.2. Industria Hidrocarburífera en la Provincia del Neuquén.....	64
4.2.1. Generación de Residuos Peligrosos en la Actividad Hidrocarburífera. Provincia del Neuquén.....	65
4.2.2. Tratamiento de los Residuos Sólidos Peligrosos Generados en la Actividad Hidrocarburífera de la Provincia del Neuquén.....	69
4.2.2.1. Co-procesado de los Residuos Peligrosos.....	69
4.2.2.2. Plantas de Tratamiento Térmico Ubicadas en la Provincia del Neuquén.....	71
4.3. Preparación y Organización para Aplicar el AHP Dentro del Contexto del Tratamiento Térmico de los Residuos Generados en la Actividad Hidrocarburífera de la Provincia del Neuquén.....	73
4.3.1. Información Requerida.....	73
4.3.2. Recursos asociados al proceso.....	73



4.3.3.	Estructuración del Modelo Jerárquico.....	73
4.3.4.	Identificación del Problema.....	73
4.3.5.	Definición del Objetivo	74
4.3.6.	Identificación de Criterios y Subcriterios	74
4.3.7.	Identificación de Alternativas	75
4.3.8.	Árbol de Jerarquías.....	76
4.4.	Evaluación del Modelo	77
4.4.1.	Emisión de Juicios y Evaluaciones	77
4.4.2.	Prioridad Respecto a la Meta Global	77
4.4.3.	Prioridad Respecto a los Criterios.....	78
4.4.3.1.	Criterio ambiental.....	78
4.4.3.2.	Criterio Económico.....	80
4.4.3.3.	Criterio Social.....	81
4.4.3.4.	Criterio Técnico.....	81
4.5.	Evaluación de las Alternativas	82
4.5.1.	Criterio Ambiental	82
4.5.2.	Criterio Económico.....	91
4.5.3.	Criterio Social.....	97
4.5.4.	Criterio Técnico.....	99
5.	RESULTADOS	105
5.1.	Prioridad Respecto a la Meta Global.....	105
5.2.	Prioridad Respecto a los Criterios.....	106
5.2.1.	Criterio Ambiental	106
5.2.2.	Criterio Económico.....	109
5.2.3.	Criterio Social.....	111
5.2.4.	Criterio Técnico.....	112
5.3.	Selección del Sistema de Tratamiento Térmico.....	114
6.	CONCLUSIONES.....	117
	BIBLIOGRAFÍA.....	119



LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de tratamientos para residuos peligrosos	15
Cuadro 2. Tipos de hornos	19
Cuadro 3. Sistemas de tratamiento de emisiones.....	34
Cuadro 4. Métodos multicriterios de selección y toma de decisiones	49
Cuadro 5. Características de los residuos sólidos en la fase de exploración. .	66
Cuadro 6. Características de los residuos sólidos en la fase de explotación....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de incineración.	20
Figura 2. Típico horno incinerador rotativo	22
Figura 3. Esquema general del proceso de gasificación.....	24
Figura 4. Antorcha usada para la generación del plasma.....	26
Figura 5. Diagrama de flujos en un proceso de incineración	31
Figura 6. Jerarquía para la selección de tecnología.	57
Figura 7. Ubicación de la Provincia del Neuquén.	60
Figura 8. Usos del suelo, localidad Senillosa.....	62
Figura 9. Ubicación del Proyecto.	63
Figura 10. Áreas hidrocarburíferas de la cuenca Neuquina.	65
Figura 13. Caracterización de residuos sólidos para el Yacimiento Unidad Económica Loma La Lata (UELLL).	68
Figura 14. Caracterización de residuos sólidos peligrosos del el Yacimiento de la Unidad Económica Loma La Lata (UELLL).	68
Figura 15. Árbol de jerarquías para la selección del sistema de tratamiento térmico.....	76
Figura 16. Comparación de los diferentes tipos de tratamiento térmico.	95
Figura 17. Análisis de las alternativas en función de los criterios ambientales	108
Figura 18. Priorización de alternativas con respecto al criterio ambiental.	108

Figura 19. Análisis de las alternativas en función de los criterios económicos.	110
Figura 20. Priorización de alternativas con respecto al criterio económico.....	111
Figura 21. Priorización de alternativas con respecto al criterio social.....	112
Figura 22. Análisis de las alternativas en función de los criterios técnicos.	113
Figura 23. Priorización de las alternativas con respecto al criterio técnico.	114
Figura 24. Priorización de las alternativas de selección de tratamiento térmico.	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Poder calorífico de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera.....	17
Tabla 2. Energía producida por los diferentes procesos térmicos en el tratamiento de MSW.....	41
Tabla 3. Costos en una planta de incineración de residuos municipales.....	42
Tabla 4. Costos de inversión inicial para la instalación de una planta de arco plasma.....	43
Tabla 5. Costos operativos para una planta de gasificación por arco plasma. Año de referencia 2012.	44
Tabla 6. Ingresos generados por la planta de gasificación por arco plasma. ...	45
Tabla 7. Costos de inversión para una planta de incineración. (2011)	45
Tabla 8. Costos operativos para una planta de incineración (2012)	46
Tabla 9. Ingresos generados por la planta de incineración (2012).	46
Tabla 10. Escala de preferencias. Saaty	51
Tabla 11. Índice aleatorio (Saaty, 2001).	55
Tabla 12. Costos del tratamiento de residuos por co-procesado, Mendoza.	70
Tabla 13. Costos del tratamiento térmico de residuos en Senillosa.....	70
Tabla 14. Características de los hornos, provincia del Neuquén.	72
Tabla 15. Vector propio de la matriz de criterios para la evaluación de los sistemas de tratamiento térmico.....	77



Tabla 16. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios ambientales.....	79
Tabla 17. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios económicos.....	80
Tabla 18. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios técnicos.....	82
Tabla 19. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de emisiones.	84
Tabla 20. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de ubicación geográfica.....	86
Tabla 21. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de generación de cenizas.....	88
Tabla 22. Electricidad neta generada en procesos térmicos	89
Tabla 23. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de aprovechamiento energético. ..	91
Tabla 24. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de inversión.	93
Tabla 25. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de costo operativo.	95
Tabla 26. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de ingresos.....	97
Tabla 27. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de aceptación social.....	99
Tabla 28. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio confiabilidad técnica.	101
Tabla 29. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología.	104
Tabla 30. Vector propio de la matriz que muestra la preferencia de los criterios para la evaluación de los sistemas de tratamiento térmico.	105
Tabla 31. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios ambientales para la selección del sistema de tratamiento térmico.....	107



Tabla 32. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios ambientales con respecto a las alternativas.....	107
Tabla 33. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios económicos para la selección del sistema de tratamiento térmico.....	109
Tabla 34. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios económicos con respecto a las alternativas.....	109
Tabla 35. Vector propio que muestra la importancia del criterio social con respecto a las alternativas.....	111
Tabla 36. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios técnicos para la selección del sistema de tratamiento térmico.....	112
Tabla 37. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios técnicos con respecto a las alternativas.....	113
Tabla 38. Multiplicación de los vectores propios resultantes de la priorización de las alternativas con respecto a los criterios por el vector propio de la matriz de criterios.....	115

LISTA DE ANEXOS

Anexo I. Revisión del marco normativo

Anexo II. Comparativo: Incineración, gasificación y pirólisis

Anexo III. Normativa de emisiones

Anexo IV Desarrollo de la metodología AHP



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos al Director de tesis Dr. Santiago Reyna por su guía y aportes, al programa de Maestría que me permitió acceder a docentes y bibliografía necesaria para la realización de la investigación, a mis compañeros en especial a Carolina Gallardo por la ayuda brindada durante esta etapa, a mi madre Myriam Prada por su apoyo incondicional y a la empresa Trans-ecológica S.R.L. por permitirme acceder y conocer la temática relacionada con el tratamiento térmico de los residuos.



RESUMEN

Los residuos sólidos peligrosos de la industria hidrocarburífera son aquellos residuos que pueden ser generados en las actividades de: la exploración, la explotación, el transporte, la refinación, el almacenamiento y la comercialización. La fase de la explotación es una las actividades que más generan residuos contaminados tales como: embalajes, textiles, materiales de laboratorio, elementos de protección personal, llantas, plásticos, entre otros. Por otro lado se encuentran recortes de perforación, fondos de tanque, suelos contaminados, cuyo alcance no se encuentra en la presente investigación. Por sus características peligrosas, estos residuos reciben diferentes tratamientos térmicos que buscan un mismo objetivo: modificar las características de los residuos y reducir el volumen, minimizando los impactos ambientales y los riesgos para la salud humana.

De acuerdo con la literatura revisada los tratamientos más comunes utilizados son: la incineración, la pirólisis, la gasificación y la gasificación por arco plasma. La selección de uno o más tratamientos depende de una cantidad considerable de factores o criterios, tales como: los ambientales, los económicos, los sociales y los técnicos, que para su evaluación deben tratarse de manera integrada y no como ejes separados.

El Análisis de Decisión Multicriterio permite, a través de sus técnicas, integrar los diferentes criterios con el fin de ayudar en la toma de decisiones. Para ello se utilizan las preferencias de los juicios emitidos por los expertos, sin embargo para el desarrollo de la presente investigación, dichos juicios fueron elaborados con base en la revisión bibliográfica.

El objetivo es escoger y ordenar por importancia las diferentes alternativas de un conjunto finito de acuerdo con dos o más criterios. En esta investigación se aplica, como modelo técnico multicriterio el AHP (Analytic Hierarchy Process), basados en la caracterización de los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén – Argentina.

El trabajo de investigación se desarrolló principalmente en tres fases. En la primera fase se hizo una revisión bibliográfica de las características de los residuos generados en la industria hidrocarburífera y de los diferentes tipos de tratamiento térmico existentes. En la segunda fase se realizó el diagnóstico de la cantidad de residuos, los diferentes tipos de tratamientos usados en la provincia del Neuquén y en el país, y de las características socioeconómicas del área de estudio. Finalmente en la tercera fase se aplicó la metodología de



selección AHP, teniendo en cuenta los criterios y subcriterios determinados en el desarrollo de la investigación.

La provincia del Neuquén concentra un 11.2% de las reservas de petróleo y un 42.3% de las existencias del gas natural del país, indicando que el sector petrolero es y continúa proyectándose como la principal actividad industrial para la economía de la región. Actualmente, en la provincia existen cuatro plantas habilitadas para el tratamiento térmico de los residuos peligrosos creando diferentes focos de impacto social y ambiental. Esta investigación ofrece una metodología para la selección de una alternativa donde, considerando los criterios: técnicos, ambientales, económicos y sociales, se realice el tratamiento térmico en una sola planta, minimizando los impactos en las diferentes áreas donde actualmente se desarrolla el tratamiento de los residuos.



ABSTRACT

Hazardous solid wastes generated by oil & gas companies are produced in the activities of exploration, production, transport, refining, storage and commercialization. Production is one of the activities that generates the most quantity of hazardous wastes such as baling, textiles, laboratory materials, personal protection equipment (PPE), tyres, plastics etc. Other types of wastes include drill cuttings, contaminated soil, and tank bottoms, whose scope is not included in this research.

Due to its dangerous characteristics, hazardous wastes undergo thermal treatment that modifies their characteristics; reduce their volume, which minimizes the environmental impacts and the human health risk. According to the literature, the most common thermal treatments are: incineration; pyrolysis; gasification; and arc plasma gasification. The selection of one or more treatments depends on environmental, economic, social, and technical criteria. Multi-criteria analysis allows integration of different criteria for improve process selection decisions, where expert judgement is essential, nevertheless in this research the information is based on published data.

This thesis objective is to choose, and order by importance, the different alternatives of a finite set according to two or more criteria. An Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied as the multi-criteria model based on the characterization of hazardous solid wastes generated by oil and gas companies in the province of Neuquén, Argentina.

The investigation was developed in three phases. The first phase was a review of the published data and research on the available thermal treatment technologies. The second phase was to determine the amount of waste, the characteristics, and the different types of treatment used in the province of Neuquén. Finally, the third phase applied AHP methodology, taking into account multiple criteria and sub-criteria determined to be important in the investigation.

The Province of Neuquén, Argentina has 25% of the petroleum reserves and 48% of the natural gas reserves in the country, resulting in a large amount of current and potential oil & gas activity in the region.

Currently, in the province there are four operating thermal plants which cause environmental and social impacts. This research provides a methodology, whereby considering the technical, environmental, economic and social criteria, permits the thermal treatment a unique thermal plant.



INTRODUCCIÓN

A medida que el mundo evoluciona, las sociedades cambian sus esquemas de producción y consumo. Esto se ve reflejado en el crecimiento poblacional y desarrollo tecnológico que ha traído como consecuencia un aumento en los volúmenes de residuos, que comúnmente se clasifican en: domiciliarios, industriales, peligrosos, entre otros.

Como residuo domiciliario se define a aquél que por su naturaleza, composición, cantidad y volumen es generado en viviendas o en cualquier establecimiento asimilable a éstas. El residuo industrial, por otro lado, es generado en actividades propias de este sector como resultado de los procesos de producción. Por su parte, la Ley Nacional N° 24051/91, dentro del territorio argentino, define residuo peligroso a *“todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general....residuos indicados en el Anexo I¹ o que posean alguna de las características enumeradas en el Anexo II²”*.

Para tratar los residuos peligrosos se conocen diferentes tecnologías que se pueden agrupar en: tratamientos físicos, químicos, biológicos y térmicos. La aplicabilidad de cada uno depende, inicialmente, de aspectos técnicos como son las características y la cantidad de los residuos.

En una región, la generación de residuos peligrosos está asociada al desarrollo tecnológico de los diferentes sectores como el alimentario, metalúrgico, textil, petrolero, etc. En Argentina, la presencia de las cinco cuencas petroleras: Cuenca Noroeste, Cuenca Cuyana, Cuenca Golfo de San Jorge, Cuenca Neuquina y Cuenca Austral, determinan el gran desarrollo por parte del sector petrolero, siendo la Cuenca Neuquina una de las más importantes ya que concentra un 25% de las reservas de petróleo y un 48% de las existencias de gas natural del país. Hay que resaltar que se halla moderadamente explorada, considerando la relación entre número de pozos perforados y la superficie total, lo que indica que el sector petrolero es y continúa proyectándose como una actividad económica de relevancia y como toda actividad productiva, en todas sus etapas, causa impactos sobre el medio ambiente, donde la generación de residuos peligrosos requiere una importante atención.

En el anexo VII de la Ley N° 1875 de la provincia del Neuquén, en su artículo N° 62, referido a la tipificación, transporte, tratamiento y disposición

¹ Ley Nacional N°24051/91. Para el territorio argentino. Anexo I. Categorías sometidas a control.

² Ley Nacional N° 24051/91. Para el territorio argentino. Anexo II. Lista de características peligrosas.



final de residuos, y sustancias provenientes de la actividad hidrocarburífera, establece que, los residuos de la industria son considerados "residuos especiales" en los términos del anexo VIII³, siéndole por tanto aplicables sus normas sin perjuicio de las normas particulares enunciadas....". Esto quiere decir que la provincia del Neuquén cataloga y regula los residuos generados en la actividad hidrocarburífera como residuos especiales.

A diferencia de la provincia del Neuquén, la provincia de la Pampa mediante su decreto N° 298/06, y la provincia de Santa Cruz decreto reglamentario N° 712/02, anexo X de la Ley N°2567, categorizan los residuos generados en la actividad hidrocarburífera como residuos petroleros. Por definición, un residuo petrolero es: *"Todo material o suelo afectado por hidrocarburos como resultado de tareas de exploración, perforación, producción, mantenimiento y limpieza y/o derrames de hidrocarburos en suelo y/o agua, con un contenido de hidrocarburos totales de petróleo mayor a 2,00 % p/p sobre masa seca o su equivalente 20.000 mg/Kg". "Se considera también residuo petrolero a toda indumentaria de trabajo (guantes, mamelucos, etc.) y trapos que contienen hidrocarburos"*.

Dentro de las metodologías de tratamiento aplicables a los residuos peligrosos generados en la industria hidrocarburífera se encuentran: los tratamientos físicos, químicos, biológicos y los tratamientos térmicos. Los físicos y químicos son seleccionados en su mayoría para tratar los residuos peligrosos que se generan en fase líquida. En el caso de la industria hidrocarburífera se aplican a glicoles usados, agua de lavado de trapos y aguas de producción, etc. Por su parte, los tratamientos biológicos son aplicables fundamentalmente a suelos y lodos contaminados con hidrocarburo y, los tratamientos térmicos son viables para tratar residuos sólidos peligrosos con un elevado poder calorífico (cartón, trapos, plásticos, etc).

La inyección profunda es una metodología físico-química aplicada al tratamiento de los residuos líquidos generados en la industria hidrocarburífera. Esta tecnología, usada para la disposición de las aguas de formación, es definida como el traspaso de desecho del material líquido en los estratos geológicos aislados, situando los desechos en espacios de la corteza terrestre que están libre de los efectos usuales del ciclo hidrológico (EPA, CFR 40 Parte 267, subparte G y Parte 146 & 148). Por su parte los suelos y lodos contaminados son tratados por métodos térmicos a través de la tecnología de desorción térmica o pueden aplicarse procesos de biorremediación, y finalmente, los residuos sólidos peligrosos como plásticos, cartón, tyveck etc., debido a su elevado poder calorífico, son tratados por vía térmica.

³ Ley N°1875 provincia del Neuquén. Anexo VIII, Normas para el manejo de los residuos especiales.



En la industria se generan otro tipo de residuos peligrosos como los metales contaminados, las pilas y las baterías, tubos fluorescentes etc., que no aplican a ninguno de los tipos de tratamientos mencionados. Estos materiales pueden reciclarse (cuando no tienen material contaminante) o enviados a disposición final en rellenos de seguridad.

El tipo de residuos, objeto de la presente investigación, son los sólidos peligrosos con alto poder calorífico como los plásticos, cartón, tyveck etc., generados en la actividad hidrocarburífera. Las metodologías térmicas o alternativas de tratamiento más usadas para este tipo de residuos son: la incineración, la pirolisis, la gasificación, y la gasificación por arco plasma. Existen otras tecnologías para el tratamiento de residuos como el sistema de microondas, el co-procesado, cuya aplicación es evaluada para el tipo de residuos de la presente investigación.

Con el fin de seleccionar y ordenar por importancia las diferentes alternativas de tratamiento térmico, la presente investigación se centró en el uso de la metodología de Análisis de Decisión Multicriterio, específicamente el modelo el AHP (Analytic Hierarchy Process), donde, a partir de la determinación de criterios y subcriterios, se elaboran las matrices pareadas, valoradas desde la revisión bibliográfica. Como resultado se obtiene la alternativa aplicable basada en la caracterización de los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén – Argentina.



CAPÍTULO I

1. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de Investigación

El importante crecimiento de la actividad hidrocarburífera en la Cuenca Neuquina trae consigo el incremento en la generación de residuos peligrosos cuya principal característica es el alto poder calorífico. De acuerdo a ello, es necesario evaluar alternativas de tratamiento térmico, tomando en consideración las variables ambientales, económicas, sociales y técnicas.

Los residuos generados en la actividad hidrocarburífera estudiados en esta tesis son los sólidos peligrosos, exceptuando los residuos líquidos, fondos de tanque y suelos contaminados con hidrocarburos.

La problemática que enfrenta la provincia del Neuquén es el alto grado de contaminación causado tanto por los residuos como por las plantas habilitadas para el tratamiento térmico de los mismos. La cantidad calculada de residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera (fase de explotación) es de 32 ton/día y la capacidad de tratamiento es de 34 ton/día. Lo anterior significa que la capacidad de las plantas instaladas actualmente es suficiente para tratar los residuos generados, sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de empresas habilitadas para el tratamiento de residuos peligrosos es alta, lo cual genera mayor vulnerabilidad con relación a la posible afectación o impacto negativo al medio ambiente. Las empresas habilitadas se han ido desarrollando de acuerdo al incremento de la generación de residuos, sin prever una planificación y un diseño metodológico de la tecnología a aplicar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Aplicar una metodología en la toma de decisión sobre la tecnología de tratamiento térmico de residuos sólidos peligrosos; exceptuando los fondos de tanques y suelos contaminados, generados en la actividad hidrocarburífera que represente una mejor opción ambiental, económica, social y técnica para la provincia del Neuquén.



1.2.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un diagnóstico que permita conocer la situación actual relacionada con la generación y con los sistemas térmicos aplicables al tratamiento de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera.

- Determinar las variables o subcriterios agrupados en los criterios; ambiental, económico, social y técnico, para la evaluación de las diferentes tecnologías de tratamiento térmico.

- Desarrollar la metodología de decisión para la selección de la mejor alternativa de tratamiento térmico aplicable a los residuos generados en la actividad hidrocarburífera.

1.3. Metodología

Con base en los objetivos propuestos inicialmente, para la selección del sistema de tratamiento térmico aplicable a los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén, se diseñaron las siguientes fases:

Fase I – Revisión bibliográfica. En este proceso se definieron los conceptos relacionados con:

- a) La industria hidrocarburífera: generalidades, impactos causados en cada fase operativa y tipos de residuos generados.

- b) Las tecnologías de tratamiento; aspectos ambientales, económicos, técnicos y sociales de los tratamientos de incineración, pirólisis, gasificación, gasificación por plasma, co-procesado y microondas.

- c) La metodología para la toma de decisión, en donde se hace una descripción de las herramientas que se utilizan para la construcción del modelo de selección de la alternativa más viable para el tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.



Fase II – Diagnóstico. El desarrollo del diagnóstico se realizó por medio de la información secundaria disponible en el área de estudio. En esta fase se hizo una descripción general del área (aspectos físicos y sociales), se detalló el desarrollo de la industria hidrocarburífera en la provincia del Neuquén, la cuantificación de los residuos sólidos peligrosos y los sistemas de tratamiento térmico desarrollados a nivel provincial y nacional. Así mismo, se hizo una revisión de la normativa aplicable para el desarrollo de la presente investigación.

Fase III – Aplicación del AHP (Analytical Hierarchy Process) como método para la selección de la alternativa de tratamiento térmico de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén. Para el desarrollo de cada una de las etapas del método AHP se hizo uso de las hojas de cálculo de Microsoft Excel ®.

Inicialmente se definió el problema y el objetivo para luego identificar los criterios, subcriterios y alternativas. Con esta información se construyó el árbol de jerarquía.

Posteriormente, se procedió a la evaluación del modelo, en donde a través de juicios (determinados por la revisión bibliográfica) se construyeron matrices de comparaciones por pares, cuya valoración numérica fue dada por la escala de valoración de Thomas Saaty (1980). De esta manera se estableció la prioridad de los criterios (ambiental, económico, técnico y social) con respecto a la meta global y a la prioridad de los subcriterios (emisiones, generación de cenizas, costo de operación, madurez de la tecnología, aceptación social, entre otros) con respecto a los criterios.

Por último, se procede a evaluar las diferentes alternativas (incineración, pirólisis, gasificación y gasificación por plasma) para cada uno de los subcriterios agrupados en criterios.

Fase IV – Selección de la alternativa. Una vez realizadas las comparaciones se obtiene como resultado final el ordenamiento de las alternativas. La alternativa con mayor porcentaje es la opción más viable de acuerdo a los criterios ambientales, económicos, técnicos y sociales, aplicables al tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de la Industria Hidrocarburífera

En cuanto a fuentes primarias de energía, el petróleo con una cuota de 33,4% en 2012 sigue siendo la fuente de mayor participación en la canasta energética mundial y un crecimiento interanual de 1,2% en los últimos doce años⁴.

El petróleo es un compuesto químico complejo en el que coexisten partes sólidas, líquidas y gaseosas. Lo forman, por una parte, unos compuestos denominados hidrocarburos, formados por átomos de carbono e hidrógeno y, por otra, pequeñas proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. No se localiza habitualmente en el lugar en el que se generó, sino que ha sufrido un movimiento vertical o lateral, filtrándose a través de rocas porosas, hasta encontrar una salida exterior o hasta encontrar una roca no porosa que le impide la salida. Entonces se habla de un yacimiento (Aguirre, 2007).

A partir del yacimiento se desarrollan las etapas de la actividad hidrocarburífera que se describen a continuación:

2.1.1. Prospección y Exploración

Para descubrir los lugares donde existen los yacimientos de petróleo es preciso realizar las tareas de exploración para el estudio del terreno. La etapa de exploración emplea métodos geológicos y geofísicos.

Los métodos geológicos son estudios de superficie donde se desarrollan actividades de: la recolección de muestras de terreno, la inspección con rayos X y la perforación para el estudio de estratos. Por su parte, los métodos geofísicos estudian las características del subsuelo sin tener en cuenta las de la superficie. Los métodos geofísicos más empleados son: la prospección sísmica, la gravimetría, la magnetometría, la magnetotelúrica y la geoquímica.

⁴ Tomado el 03/03/2016 de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena_del_petroleo_2013.pdf



La prospección sísmica, consiste en crear temblores artificiales de tierra mediante explosivos que causan ondas con las que se hace una ecografía del subsuelo. La aeromagnetometría y la gravimetría, sirven para determinar el espesor de la capa sedimentaria. La magnetotelúrica mide las resistividades del suelo a partir de campos eléctricos y magnéticos naturales.

Luego de obtenidos los datos geológicos y geofísicos se procede a procesarlos e interpretarlos determinando las ubicaciones para la perforación de los pozos exploratorios. El objetivo de la perforación exploratoria es confirmar la presencia de yacimientos petroleros. Si el pozo no contiene ningún hidrocarburo (crudo, condensados o una mezcla de estos) es considerado como seco, pero si lo contiene, se llama productor (Ruíz, 2007).

2.1.2. Explotación.

La explotación de un yacimiento de petróleo inicia con la actividad de la perforación de pozos. Actualmente, debido a la profundidad de los pozos petrolíferos (entre los 900 m y 8.000 m) se usa método de rotación. Este consiste en un sistema de tubos acoplados unos a continuación de otros que, impulsados por un motor, van girando y perforando hacia abajo. En el extremo se halla una broca o trépano con dientes que rompen la roca, cuchillas que la separan y diamantes que la perforan. Para evitar las alteraciones de los estratos del subsuelo y que las paredes del pozo se derrumben durante la perforación, este se va recubriendo mediante unas paredes –o camisas- de acero. (Aguirre, 2007).

Para el proceso de perforación es indispensable la utilización de lodos o fluidos en cuyo caso se utilizan mezclas preparadas con gran cantidad de aditivos químicos. Los fluidos se administran mediante el llamado sistema de circulación y tratamiento de inyección. Las funciones del sistema son: preparar el fluido, recuperarlo al retornar a la superficie, mantenerlo limpio, tratarlo químicamente y bombearlo al pozo.

Una vez finalizadas las tareas de perforación y desmontado del equipo, se procede a la terminación y reequipamiento del pozo que, consiste en el empleo de una unidad especial que permite el ensayo y posterior puesta en producción del mismo.

Existen varios sistemas o métodos de producción de hidrocarburos, los más importantes son:



- a) Método de producción natural de petróleo y gas o de recuperación primaria, el cual aprovecha la presión natural que posee el yacimiento, así como la permeabilidad de las rocas.

- b) Métodos de producción secundaria o terciaria. Son aquellos que, por medio de la inyección de fluidos, permiten recuperar mayor porcentaje de hidrocarburo. Estos métodos pueden incluir técnicas como:
 - La inyección de gas, que se lleva a cabo por medio de pozos perforados para tal fin,

 - La inyección o inundación de agua en el yacimiento, que permita concentrar el petróleo hacia las áreas de drenaje de los pozos y,

 - La inyección de fluidos como el vapor de agua, el dióxido de carbono, y diferentes productos químicos.

La producción trae consigo un gran montaje de infraestructura en la zona establecida, donde se instalan: tuberías y líneas de recolección, separadores, tanques, plantas de tratamiento de gas y agua, piscinas de recolección, ductos, etc. Estas instalaciones son conocidas en la industria hidrocarburífera como batería o facilidades de producción. Además está el área para las vías de acceso, fuentes de materiales, tratamiento y disposición de desechos, líneas de flujo y troncales, fuentes para captación y vertimientos de agua, y los campamentos. (Ruíz, 2007).

Las piscinas de desechos de las estaciones reciben las aguas de producción que provienen de las formaciones geológicas obtenidas durante la extracción de petróleo. Dichas aguas contienen cantidades de sales como: el calcio, el magnesio, el sodio, y gases disueltos como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y otros, además de sólidos suspendidos que pueden contener trazas de metales pesados y niveles de crudo suspendido o emulsionado.

Una vez que los hidrocarburos son extraídos del yacimiento son colectados por los sistemas de transporte de la producción. El petróleo crudo será conducido hacia los procesos de separación de agua, de sedimentos o de otras impurezas para luego ser almacenado o enviado a las plantas de refinación.



2.1.3. Transporte

Para efectuar el transporte del petróleo crudo y del gas se utilizan normalmente oleoductos o gasoductos, según sea el caso; asimismo son usados los barcos o buques-tanque.

Los sistemas de transporte por ductos son comunes en varias regiones del mundo, como es el caso de la red de tuberías entre Europa y los países productores (la Federación Rusa, o los países del Oriente Medio). Sin embargo, se calcula que más del 70% del petróleo consumido es transportado por barcos.

2.1.4. Refinación

La refinación es el proceso que se encarga de la transformación de los hidrocarburos en productos derivados. Este proceso comprende: la separación, la transformación y la purificación, mediante los cuales el petróleo crudo es convertido en productos útiles, que van desde los gases ligeros, como el propano y el butano, hasta las fracciones más pesadas, fuelóleo y asfaltos, pasando por otros productos intermedios como las gasolinas, el gasoil y los aceites lubricantes.

Los procesos de refino dentro de una refinería se pueden clasificar de forma general en: destilación, conversión y tratamiento. El objetivo de la destilación es separar los diversos componentes del crudo mediante calor. La conversión (cracking y el reformado) consiste en una ruptura molecular a través de técnicas térmicas, que rompe las moléculas mediante calor o el craqueo catalítico que hace la misma operación mediante un catalizador. Por último, el tratamiento tiene el objetivo de eliminar o transformar los compuestos no deseados, principalmente los derivados del azufre.

Una refinería comprende: una central termoeléctrica, un parque de reservas para almacenamiento, bombas para expedición por tubería y una estación para vehículos de carretera para la carga de camiones cisterna. Es, pues, una fábrica compleja que funciona 24 horas diarias con equipos de técnicos que controlan por turno todos los datos (Instituto de desarrollo Industrial Tecnológico y de Servicios IDITS., 2005).



2.1.5. Almacenamiento

El almacenamiento debe quedar asegurado en cada etapa de la industria hidrocarburífera. Entre los diferentes almacenamientos se tienen:

- a) Almacenamiento del bruto. Es el realizado en el punto de embarque y desembarque del trayecto yacimiento-refinería.
- b) Almacenamiento en la refinería. Es el realizado en numerosos depósitos aguas arriba y debajo de cada unidad de proceso para absorber las discontinuidades debidas a los paros de mantenimiento y a los tratamientos alternativos.
- c) Almacenamiento de distribución. Es el depósito pulmón abastecido por el medio de transporte que viene de la refinería ya sean conducciones, buques, vagones cisterna o camiones cisterna. A partir de este, se lleva el producto al consumidor final a través de trayectos más cortos (Aguirre, 2007).

2.1.6. Comercialización

La comercialización de los productos finales del refinado del petróleo se realiza por distintos canales como son: estaciones de servicio, a través de mayoristas, a industrias, a puertos y aeropuertos, etc.

La ejecución de cada una de las etapas de la actividad hidrocarburífera descritas implica interacciones con el entorno natural traducidas como impactos ambientales, descritos a continuación.

2.2. Impactos Ambientales Generados en la Actividad Hidrocarburífera

A nivel mundial, el significativo aumento de la producción de hidrocarburos registrado en las últimas décadas se ha traducido en una magnificación del impacto ambiental. Es por ello la importancia de identificar los principales impactos asociados al desarrollo de cada una de las etapas de la industria:

- *Exploración y prospección.* El principal componente afectado en la etapa de exploración es el suelo. El impacto en el suelo está asociado con la apertura



de “picadas sísmicas” quedando expuesto a procesos de erosión causados por la eliminación de la vegetación existente. Por otro lado, las perforaciones exploratorias traen consigo el emplazamiento de equipos y campamentos temporales y por consiguiente la generación de residuos asimilables a urbanos, industriales y peligrosos.

- *Explotación.* Los principales componentes afectados en la etapa de la explotación hidrocarburífera son la calidad del aire, el suelo y el recurso hídrico.

El impacto en la calidad del aire está asociado al venteo de gases, la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOC's), el uso de aditivos químicos, etc.

El suelo por su parte es afectado por la apertura de las locaciones de pozos y de piletas, la construcción de caminos, líneas eléctricas, oleoductos, gasoductos, acueductos, baterías de petróleo, unidades de separación primaria, plantas de tratamiento, playas de tanques, estaciones de bombeo de los oleoductos, estaciones de compresión de los gasoductos, plantas de reinyección de aguas de formación y reinyección de gases, etc. Todas estas actividades producen importantes movimientos en el suelo que alteran el perfil edáfico, provocan daños en la cobertura vegetal y afectan la fauna autóctona de la región.

Por otro lado, el posible vertimiento de las aguas de producción y de formación, las pérdidas de boca de pozo, el descontrol de pozos, el contacto de aceites y lodos a causa de la no impermeabilización de los depósitos de cortes de perforación pueden causar significativos impactos en el suelo y en el recurso hídrico superficial y subterráneo.

En la fase de explotación existe una importante generación de residuos sólidos, semisólidos y líquidos, clasificados como asimilables a urbanos, industriales y peligrosos. Los residuos peligrosos están asociados a la generación de lodos y cortes de perforación, aguas de formación, materiales contaminados con sustancias peligrosas como por ejemplo textiles y elementos de protección personal (EPP) impregnados de hidrocarburo.

- *Almacenamiento y transporte.* La contaminación al suelo se registra ocasionalmente por derrames ante roturas de oleoductos, descontrol de pozos, rebalses de tanques, pérdidas en bocas de pozo, etc., o bien por su volcado con aguas de formación a piletas naturales excavadas en el terreno y no impermeabilizadas.



- *Refino y distribución.* En la refinería existe un claro impacto negativo en la calidad del aire a causa de las emisiones producidas por los diferentes procesos y por la flota vehicular. El suelo por su parte se ve directamente afectado debido al escurrimiento e infiltración de tanques, goteo en la zona de entrega de productos, derrames accidentales etc.

En todas las actividades de la industria hidrocarburífera se generan residuos sólidos clasificados en las corrientes de: asimilables a urbanos, industriales y peligrosos. El no cumplimiento de los requerimientos normativos relacionados con el tratamiento y disposición de los residuos generados se convierte en una fuente de riesgo para el ambiente y la salud.

En la provincia del Neuquén-Argentina, área de estudio de la presente investigación, la industria hidrocarburífera es una de las principales actividades económicas y por ello deben considerarse los posibles impactos en el ambiente. Los residuos sólidos específicamente se generan en todas las etapas de la industria, siendo de gran importancia su tratamiento y disposición final.

2.3. Residuos Sólidos Generados en la Industria Hidrocarburífera

Antes de entrar en detalle en el manejo de los residuos sólidos peligrosos generados en la industria hidrocarburífera, se hace imperante conocer las definiciones y tipos de clasificación de los residuos.

2.3.1. Definiciones de Residuo

A continuación se listan las diferentes definiciones de residuo tomadas de la guía para la gestión integral de residuos peligrosos (Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, 2005).

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.(PNUMA) Residuo incluye cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material que figura como residuo en las listas o tablas apropiadas y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono.
- Convenio de Basilea. Se denominan desechos a las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional.



- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir que ha sido abandonado, es reciclado o considerado inherentemente residual.
- La DIRECTIVA 2008/98/CE define *residuo* como “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”.

2.3.2. Clasificación de Residuos

Los residuos se pueden clasificar según el estado físico en que se encuentre (sólidos, líquidos y gaseosos), por sus características químicas (orgánicos e inorgánicos), por el grado de degradación en el ambiente (biodegradable y no biodegradable), por sus características físicas (inertes y combustibles), por la actividad que lo origina (municipales, industriales, mineros, hospitalarios, etc.) y por su tipo de manejo (peligroso, no peligroso, especiales y peligrosos biológicos-infecciosos).

De acuerdo a los criterios de clasificación mencionados, los residuos generados en la industria hidrocarburífera, objeto de la presente investigación, se clasifican como residuos sólidos, peligrosos y combustibles.

2.3.3. Residuos Peligrosos

Existen un sin número de definiciones de residuo peligroso a nivel mundial. En cada país hay un método y un listado de sustancias diferente para desarrollar el concepto. Para comprender las diferencias entre conceptos, se revisan las siguientes definiciones:

La Agencia de Protección Ambiental (EPA). Define un residuo peligroso como cualquier desecho, o combinación de desechos, que a causa de su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas puedan: causar o contribuir significativamente a un incremento en la mortalidad, o a un incremento en enfermedades serias e irreversibles o, presentar un potencial peligro para la salud humana o el ambiente cuando son impropriadamente tratados, almacenados, transportados, o desechados.

La Organización de las Naciones Unidas (O.N.U) Define como residuos peligrosos a “aquel residuo que, en función de sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y



patogenicidad, puede presentar un riesgo a la salud pública o causar efectos adversos al ambiente. No incluye los residuos radiactivos”.

La Comunidad Económica Europea (C.E.E), se refiere a residuos tóxicos y peligrosos a “desechos con contenido o contaminado por sustancias o materiales con propiedades peligrosas, en cantidad o concentraciones que puedan constituir un riesgo a la salud o al ambiente”

En Colombia, según el decreto 1713 de 2002, residuo o desecho peligroso “es aquel que por sus características infecciosas, tóxicas, explosivas, corrosivas, inflamables, volátiles, combustibles, radiactivas o reactivas puedan causar riesgo a la salud humana o deteriorar la calidad ambiental”. También son residuos peligrosos “aquellos que sin serlo en su forma original se transforman por procesos naturales en residuos peligrosos. Así mismo, se consideran residuos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos”.

La República Argentina reglamenta los residuos peligrosos a través de la ley nacional N° 24051 de 1991. En el Artículo 2º, define residuo peligroso como: “todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general. En particular serán considerados peligrosos los residuos indicados en el Anexo I o que posean alguna de las características enumeradas en el Anexo II de esta ley”.

Luego de haber revisado algunas de las definiciones que existen para los residuos peligrosos, a efectos de la presente investigación se propone la siguiente definición:

Residuo peligroso es todo material líquido, sólido, gaseoso que por sus características infecciosas, de toxicidad, explosividad, corrosividad, inflamabilidad, volatilidad y reactividad, puedan causar riesgo a la salud y al medio ambiente. También son residuos peligrosos aquellos que sin serlo en su forma original se transforman por procesos naturales o industriales en residuos peligrosos. No se incluyen los residuos radiactivos.

2.3.4. Residuo Petrolero

Según el decreto N° 298 de 2006 de la provincia de La Pampa, un residuo petrolero es: “todo material o suelo afectado por hidrocarburos como resultado de tareas de exploración, perforación, producción, mantenimiento y limpieza y/o

derrames de hidrocarburos en suelo y/o agua, con un contenido de hidrocarburos totales de petróleo mayor a 2,00 % p/p sobre masa seca o su equivalente 20.000 mg/kg”. “Se considera también residuo petrolero a toda indumentaria de trabajo (guantes, mamelucos, etc.) y trapos que contienen hidrocarburos”.

2.4. Tecnologías de Tratamiento

Prevenir y minimizar los residuos constituye el nivel de gestión requerido por la legislación nacional. Reduce la presión sobre las instalaciones de tratamiento y disposición final, disminuye gastos y ahorra recursos. Sin embargo, cuando no es posible evitar o minimizar, se hace necesario recurrir a opciones de tratamiento y disposición final.

Para tratar los residuos peligrosos se conocen diferentes metodologías que se pueden agrupar en tratamientos físicos, químicos, biológicos y térmicos. Las características de los residuos es un aspecto clave en la selección del tipo de tratamiento. Debido al importante poder calorífico de los residuos condicionados generados en la actividad hidrocarburífera, tema de esta tesis, se evalúan en detalle las metodologías térmicas, tales como: la incineración, la pirólisis, la gasificación, la gasificación por plasma, el co-procesado, microondas y la vitrificación.

El tratamiento de residuos consiste en un proceso de transformación cuyo objetivo es disminuir la peligrosidad de sustancias. Cada proceso genera residuos secundarios que requieren una gestión especial en función de sus características.

Los tipos tratamiento pueden ser:

- Físicos y químicos, utilizados habitualmente en el tratamiento de aguas residuales, residuos tóxicos en aguas superficiales y subterráneas, derrames de petróleo y también a, algunos materiales peligrosos sobre el suelo o bajo tierra.
- Biológicos, que consisten en la descomposición de contaminantes por acción de un conjunto de microorganismos, y
- Térmicos, cuando se utilizan hornos a altas temperaturas para la destrucción de los residuos.



En el Cuadro 1 se describen los tipos de tratamientos y su aplicabilidad sobre los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. Según se observa, las metodologías físico-químicas son aplicables en su mayoría a residuos líquidos como efluentes de mantenimiento, lavado etc., y fluidos de producción. Las aguas de formación⁵ no están incluidas ya que son dispuestas mediante inyección profunda, definida como el traspaso de desecho del material líquido en los estratos geológicos aislados, situando los desechos en espacios de la corteza terrestre que están libre de los efectos usuales del ciclo hidrológico (EPA, 1989)

Para el tratamiento físico-químico de los residuos empetrolados (suelo y lodos) existe el lavado de suelos o “soilwashing”, que consiste en lavar el suelo contaminado con agua o soluciones de extracción con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa (Roldan & Aguelles, 2000). El soilwashing genera cantidades considerables de agua contaminada que debe ser dispuesta conforme a la ley nacional N° 24051 de la gestión de residuos peligrosos.

Para los tratamientos biológicos se usan bacterias que degradan los restos de hidrocarburo presente en los residuos empetrolados. Las principales metodologías son: I) biopilas, que consisten en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad (Roldan & Aguelles, 2000), y II) el landfarming donde la degradación se lleva a cabo en un área abierta, denominada cancha.

Otro tratamiento para los residuos empetrolados es la desorción térmica, que consiste en el calentamiento del suelo contaminado a temperaturas que van de los 200 °F a los 1000 °F para que las sustancias con bajos puntos de ebullición se vaporicen y se separen del suelo. La tecnología es especialmente eficaz para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (COV's), los bifenilos policlorados (PCB), los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los pesticidas.⁶

⁵ *Aguas de formación*: definidas como agua naturalmente presente en las rocas inmediatamente antes de la perforación.

⁶ Tomado el 01/11/12 de www.epa.gov/superfund/action/spanish/pdfs/esp_roadmap_sec7.pdf



Cuadro 1. Tipos de tratamientos para residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.

Tratamiento			Tipo de residuos
Físico	Decantación	Elimina el contenido de agua.	Residuos líquidos peligrosos.
	Centrifugación		
	Filtración	Separa mezclas heterogéneas.	
	Adsorción	Adhiere contaminantes sobre superficies controladas.	
Químico	Neutralización	Neutraliza el pH	Residuos líquidos peligrosos.
	Oxidación - Reducción	Transformación de especies tóxicas en compuestos menos peligrosos.	
	Precipitación	Separa los componentes peligrosos de la solución	
	Intercambio del Ión	Intercambio con especies iónicas disueltas mediante el contacto con resina.	
Biológico	Tratamientos Biológicos	Los microorganismos reducen la complejidad de los compuestos químicos a compuestos más simples: landfarming o biopilas.	Residuos semisólidos peligrosos o residuos empetrolados (suelo y lodos)
Térmico	Incineración	Combustión completa con exceso de oxígeno	Residuos sólidos peligrosos
	Pirólisis	Descomposición térmica ausencia de oxígeno	
	Gasificación	Combustión incompleta con defecto de oxígeno	
	Gasificación por plasma	Ionización de un flujo gaseoso eléctricamente neutro por medio de un campo electromagnético. La energía desarrollada se concentra en un residuo de naturaleza inorgánica para fundirlo y vitrificarlo.	
	Vitrificación	Proceso de fusión. El residuo, desarrolla una estructura vítrea.	
	Coprocesado	Destrucción térmica de un residuo junto a un combustible convencional en un horno.	
	Desorción térmica	Calentamiento (200-1000°F) del suelo contaminado para que las sustancias con bajos puntos de ebullición se vaporicen y se separen.	

Fuente. Elaboración propia



Haciendo un análisis desde el punto de vista económico, la metodología térmica para el tratamiento de los residuos empetrolados requiere ocho veces la inversión de un sistema de tratamiento por biorremediación. Además el costo del proceso de biorremediación puede ser reducido aumentando la velocidad de degradación, razón por la cual se considera como mejor opción (Curci, Calleja, Videla, & Galvez, 1999). El inconveniente del tratamiento biológico es que requiere más tiempo frente a las otras alternativas.

Tanto los residuos líquidos peligrosos como los residuos empetrolados no están en el alcance de la investigación, ya que se enfatiza en las metodologías de tratamiento térmico de los residuos sólidos peligrosos condicionados generados en la actividad hidrocarburífera.

Los térmicos son tratamientos que usan altas temperaturas como principal mecanismo para la destrucción o reducción sustancial de la peligrosidad. El proceso genera residuos sólidos secundarios como cenizas y material particulado que deben ser dispuestos en rellenos de seguridad.

Un relleno de seguridad de acuerdo con la guía de legislación del ministerio de ambiente de la provincia de British Columbia, CA, (2005), es la opción para la disposición final de cualquier tipo de residuo que no se puede reducir (volumen) o disminuir su peligrosidad. Es una instalación diseñada, construida y operada para confinar los residuos por un tiempo indefinido. La disposición final en rellenos de seguridad causa problemas como: la contaminación del agua debido a la lixiviación de componentes tóxicos, las emisiones de olor y suelos contaminados y los impactos generados a largo plazo (Morselli, Robertis, Luzi, & Passarini, 2008).

En la provincia del Neuquén, área de estudio, no existe un relleno de seguridad, es por esto que se evalúa la alternativa de transportar los residuos al relleno de seguridad más cercano que, de acuerdo a su constitución, permita el ingreso de residuos peligrosos a su territorio provincial.

Debido al importante poder calorífico de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera se analizan las diferentes metodologías térmicas como tecnologías aplicables al tratamiento de este tipo de residuos.

2.4.1. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico consiste en emplear altas temperaturas como principal mecanismo para la destrucción del contaminante, eliminación o reducción



sustancial de la peligrosidad. Se considera como la mejor manera para inertizar los residuos peligrosos (Hauk, Spindeldreher, Usdrovoski, Stadmüller, & Zimmer, 2004).

En la última década la tecnología térmica aplicada al tratamiento de residuos ha ido en aumento. La tasa más alta de tratamiento térmico de residuos en el mundo es Japón con una capacidad total de 40 Mton/año (Van Caneghem, y otros, 2012). Esto es debido a que los procesos térmicos tienen las siguientes ventajas: 1) reducción del residuo en masa (70-80%) y en volumen (90%) (Consonni & Giugliano, 2005), 2) menor uso de área que los rellenos de seguridad (una planta con generación energética requiere 100.000 m² de área para 1Mt/año para 30 años, comparado con 300.0000 m² que requiere un relleno para el mismo tiempo) (Psomopoulos & Bourka, 2009), 3) destrucción de contaminantes orgánicos tales como hidrocarburos halogenados, 4) concentración e inmovilización de contaminantes inorgánicos, así pueden tener un manejo más seguro (ISWA, 2006), y 5) ambientalmente compatible, particularmente cuando la planta está diseñada y operada para la cogeneración de calor y energía.

Tabla 1. Poder calorífico de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera.

Residuo	P.C (kcal/kg)	Características	
Grasa de litio	10000	Grasa cremosa	
Pinceles	-----	Madera, plástico	
Cintas de polietileno	11000	Cintas peligro	
Espuma, rellenos de poliuretano.	5600	Poliuretano	
Revestimiento y aislantes de cables	4000	PVC: Policloruro de vinilo	
	5600	TPE: Elastómero termoplástico	
		PU: Poliuretano	
Guantes	5000	Cuero	
	4300	PVC	
Revestimientos de cañerías	10400	Polietileno, poliuretano, fibra mineral, poliestireno, elastómeros.	
Botines, máscaras, cascos, anteojos de seguridad	5000	Cuero	
	4300	PVC	
	10500	Polipropileno (cascos)	
	6690	Espuma poliuretano	
	6000	Poliéster	
	5600	Poliuretano	
Filtros con carbón activado	5740	Carbón Bituminoso	Negro, fijo (pellet, granular o polvo)
	7650	Carbón Antracita	
Filtros de aceite	10000	Aceite, inerte (metal)	



Residuo	P.C (kcal/kg)	Características
Membranas, caucho	10000	PVC – PHD
Cartón y trapos con HC	4000	Aumenta PC con el contenido de HC
Latas de pintura	5000	Solvente, inerte
Piezas automotriz	-----	Inerte
Vidrio con HC, pilas	-----	Inerte

Fuente: Elaboración propia

Una de las características importantes para la viabilidad de los procesos térmicos como tratamiento de los residuos es el poder calorífico. Un alto porcentaje de los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera tienen como característica principal un elevado poder calorífico (Tabla 1).

Para entender los procesos de tratamiento térmico es necesario conocer las definiciones de combustión y horno:

La combustión es una reacción química de oxidación entre un combustible y un comburente (p. ej. el oxígeno contenido en el aire) con producción de energía suficiente como para mantener la reacción de la misma. La reacción química puede darse en forma estequiométrica o no (Castells, 2005). Debido a los gradientes de la temperatura, la cinética y a los problemas de contacto, es necesario trabajar con exceso de aire para lograr una buena combustión. Sin embargo, a medida que el exceso de aire aumenta la temperatura disminuye llegando a obtener una combustión fría que resulta ser antieconómico por el alto requerimiento de combustible (Bonato, 2000).

Por otro lado, un horno es un dispositivo en el que se convierte la energía química de un combustible o la energía eléctrica en calor, éste se transfiere a los materiales introducidos en su interior para transformarlos. Son instalaciones que si bien se referencia por términos de masa kg/h o t/h, en realidad funcionan en términos de energía kcal/h (Castells, 2005).

Los hornos constan de cámara primaria y cámara secundaria. La cámara primaria tiene la función de volatilizar la fracción orgánica del residuo y la cámara secundaria calienta los componentes orgánicos vaporizados hasta una temperatura que se oxiden completamente. En el siguiente cuadro se presentan las características generales de los diferentes tipos de hornos.



Cuadro 2. Tipos de hornos

Variable	Tipo de horno				
	Inyección líquida	Pisos	Lecho fluidizado	Rotativo	Parrillas
Naturaleza de los residuos	Líquido	Pastosos	Sólido	Sólido/líquido /pastoso	Sólidos
Acondicionamiento	Requiere	No	Requiere	No requiere	Requiere
Capacidad de recepción	N/A	N/A	baja	Alta	Alta
Poder calorífico	3000 kcal/kg	Bajo	Bajo	Alto	Alto controlado
Emisión*	baja	baja	baja	Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tecnologías de Tratamiento Térmico

Se conocen diferentes tipos de tecnologías para el tratamiento térmico de los residuos, entre ellas: la incineración, la pirólisis, la gasificación, la gasificación por plasma, el co-procesado, microondas y la vitrificación.

2.4.1.1. Incineración

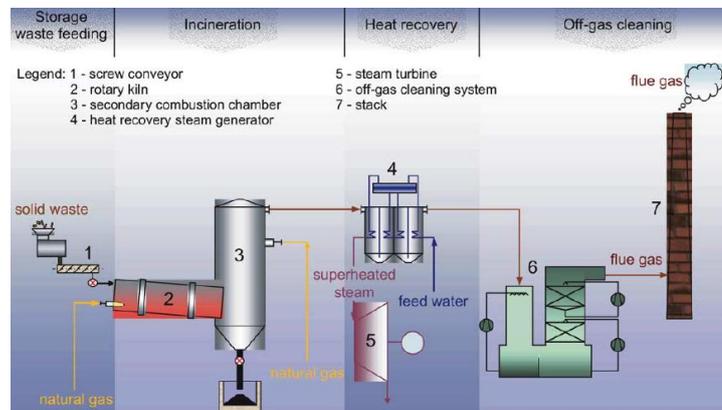
La incineración es el tratamiento más conocido a nivel comercial (Toledo & Corella, 2005), (Hauk, Spindeldreher, Usdrovoski, Stadmüller, & Zimmer, 2004), aproximadamente el 15 % de los residuos urbanos de todos los países de la CEE⁷ se tratan por medio de la incineración (Bonato, 2000). La incineración se define como el “proceso por el que se someten los materiales sólidos y líquidos a un régimen de temperaturas medias por efecto de las reacciones de oxidación exotérmica de los propios residuos y, si es preciso, del combustible aportado en presencia de exceso de oxígeno, suficiente para que casi toda (>99.99%) la fracción orgánica presente pase a la forma gaseosa. Los compuestos oxidables a esa temperatura se hayan combinados con el oxígeno y la fracción inorgánica se haya reducido a escorias (vidrio, piedras, metales) y cenizas”. (Castells, 2005). El objetivo de la incineración es la conversión de los residuos a gases de combustión, principalmente CO₂ y H₂O y la reducción en un 90% en volumen y un 70% en peso (Daskalopoulos & Badr, 1997).

Una planta de incineración incluye: el área de almacenamiento, el área del equipo de combustión, los equipos de recuperación de calor y el tratamiento de la corriente de gas (Figura 1). Los residuos son quemados bajo condiciones de exceso de oxígeno liberando el calor contenido dentro del horno. Para mantener la temperatura (850°C –1000°C) es necesario controlar el flujo de aire de acuerdo con el poder calorífico de los residuos (Bébar, Stehlík, &

⁷ Comunidad Económica Europea

Havlen, 2005). El aire juega un papel químico de aportación de oxígeno pero también físico de mezclado y turbulencia, mejorando el contacto entre el material combustible y el oxígeno.

Figura 1. Esquema del proceso de incineración.



Fuente. (Bebár, 2005)

Posterior a la combustión está la etapa de post-combustión donde se produce la oxidación completa de los residuos a una temperatura mínima de 1000°C y una concentración de oxígeno < 6 vol% (Bébar, Stehlík, & Havlen, 2005). Para el proceso, es necesaria la instalación de un sistema de limpieza de gases.

Por último, está el sistema de recuperación de calor que puede ser usado en el mismo proceso o en otros o, para la generación de energía proporcionada directamente a la red eléctrica (Vermeulen, Caneghem, Block, & Dewful, 2012). La tecnología de incineración es aplicable a residuos que poseen un poder calorífico medio y alto, que tengan una matriz fundamentalmente orgánica y no más del 60-70% de agua, para que resulte ser un proceso económicamente viable (Bonato, 2000).

Para el proceso de incineración se usan principalmente las cámaras rotativas y de parrillas. Para la tecnología de parrillas, los residuos no reciben pre-tratamiento antes de la combustión (Murphy, 2004). Este consiste en el avance del combustible por medio de elementos provistos de movimiento (Castells, 2005). La desventaja del sistema son las posibles incrustaciones de metales o fundición de material en la parrilla que genera complicaciones en las partes móviles.

Otro tipo de reactores poco comunes para la incineración son desarrollados por Indaver, Doel, Bélgica a través de la tecnología de lecho fluidizado con recuperación energética. En la planta se generan 780.000 MWh/año, que corresponde al consumo eléctrico de 220.000 familias (Van Caneghem, y otros,

2012). El exceso de aire en los reactores fluidizados causa elevadas temperaturas, razón por la cual requiere mayor cantidad de aire para el enfriamiento del lecho (Indaver).

Los residuos sólidos peligrosos condicionados de la actividad hidrocarburífera contienen aprox. un 25% de plásticos que pueden formar aglomerados sobre el sistema de parrillas y por tanto, aumentar los costos operativos y de mantenimiento.

El Bic Group, diseñadora de incineradores afirma, que para residuos con alto poder calorífico y con capacidades > 300 kg/h es operativamente seguro el uso del horno rotativo.

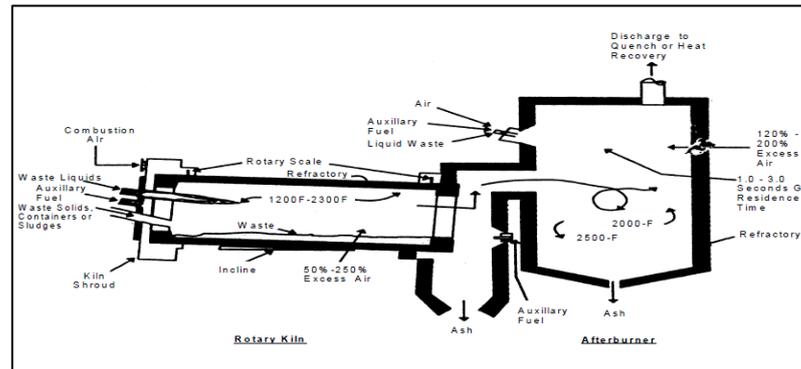
Incineración en Horno Rotativo

Un horno rotativo para la incineración de residuos es diseñado con el objetivo de destruir residuos peligrosos, tóxicos, patógenos, lodos y suelos contaminados (Vermeulen, Caneghem, Block, & Dewful, 2012). La principal función de la incineración en horno rotativo es la destrucción de los residuos peligrosos y de otros residuos complejos, no la producción de vapor y electricidad (Vermeulen, Caneghem, Block, & Dewful, 2012). En este tipo de reactores se pueden tratar residuos sólidos, pastosos, líquidos etc.

El horno rotativo consta (Figura 2) de un cilindro con revestimiento de material cerámico en su interior que va girando, con una ligera inclinación, a una velocidad variable sobre un chasis metálico. La velocidad de rotación favorece a la isoterminia y minimiza las diferencias de temperatura y oxígeno en la parte superior e inferior del horno. No obstante, a mayor velocidad mayor arrastre de partículas. El tiempo de residencia por su parte depende de las características del residuo y de las condiciones de temperatura y exceso de aire en la operación (Castells, 2005).

Este tipo de reactores están diseñados para elevados valores de temperatura ya que no hay partes metálicas que se puedan afectar en el interior del equipo. La única limitación se encuentra en la calidad del refractario y en la importante chapa de acero, dándole mayor robustez al horno.

Figura 2. Típico horno incinerador rotativo



Fuente. (EPA-530-R-94-014)

Los hornos rotativos han tenido un desarrollo importante en la incineración de residuos, compañías como: AVG Hamburg (1993), HIM Biebesheim (1989), RZR Herten (1981), hacen uso de esta tecnología, cuyo principal objetivo es el tratamiento de residuos peligrosos y no el aprovechamiento energético.

Existen otros ejemplos de hornos rotativos como son las plantas SAVA Brunsbüttel (1996), Indaver y Antwerpen, Bélgica donde operan dos hornos rotativos, cada uno con capacidad de 45.000 ton/año. Trabaja a temperaturas desde 1000°C-1200°C, en este caso, la energía es recuperada durante el proceso para el aprovechamiento en la planta y en la red pública.

2.4.1.2. Pirólisis

La pirólisis se define como la descomposición térmica de material orgánico a través de la aplicación de calor sin adición de aire u extra oxígeno (Van Caneghem, y otros, 2012). Alcanza temperaturas de 700°C (Brandrup, Bittner, & Michaeli, 1996), (Al Sallem & Lettieri, 2009) y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles (CO, H₂, CH₄ y otros hidrocarburos), residuos secos de carbón, y agua (Indaver). Estos productos pueden ser usados como combustibles o fuentes de químicos (López, Marco, Caballero, & Laresgoiti, 2010). Fue por primera vez implementada a escala industrial por RWE Power (Hauk, Spindeldreher, Usdrovoski, Stadmüller, & Zimmer, 2004).

Cuando el residuo es principalmente inorgánico, técnicamente se debe aplicar la pirolisis. En este tipo de residuos no hay reducción en volumen o masa lo cual conlleva a una mayor generación de coque o char que deberá ser dispuesto como residuo peligroso.



Es una tecnología ampliamente aplicada en la producción de combustibles a partir de biomasa (Rogers & Brammer, 2009), (Rogers & Brammer, 2012), (Wright, Daugaard, & Satrio, 2010) generalmente desarrollada en sistemas de hornos rotativos (Malkow, 2004). A pesar del uso industrial, la pirólisis de residuos sólidos no ha sido exitosa. La principal causa es la complejidad de los sistemas y las dificultades asociadas a la alimentación uniforme de los residuos.

2.4.1.3. Gasificación

La disminución de los volúmenes de vertederos y los altos costos asociados con la incineración, incrementan el interés en la aplicación de procesos de gasificación (Malkow, 2004).

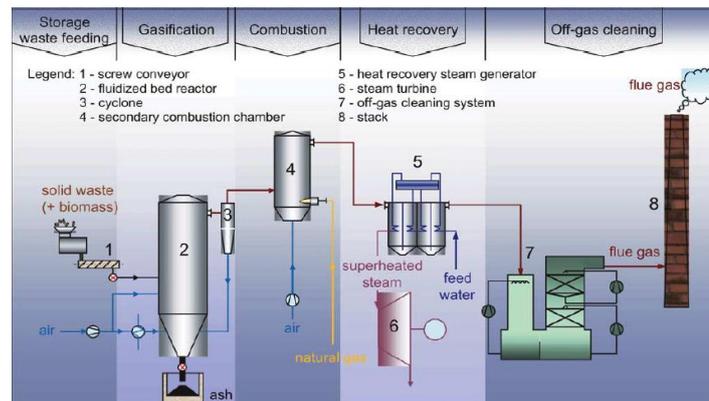
La gasificación o combustión indirecta es la conversión del residuo sólido a combustible o gas de síntesis (syngas) a través de un proceso de oxidación parcial (25-30% (Castells, 2005)) del residuo a temperaturas mayores de 600°C (Arena, et al., 2009), condiciones propicias para la formación de gas de alto valor calorífico (Quaak & Knoef, 1999) & (Cho, 1981). El aire y vapor u oxígeno y vapor pueden ser usados como medio de gasificación.

La gasificación por su parte produce CO, H₂, CO₂, H₂O y CH₄ (Arena, 2012). Genera menor volumen de gas comparado con la incineración convencional. Esta tecnología permite un menor tamaño de la cámara de combustión y su consumo de gas es reducido requiriendo un equipo de tratamiento de emisiones de menor tamaño, minimizando los costos de inversión y operación (Bébar, Stehlík, & Havlen, 2005).

En la gasificación el contenido orgánico del residuo es convertido principalmente en monóxido de carbón, hidrógeno y bajas cantidades de metano. El syngas por su parte, es contaminado por partículas, alquitrán, metales alcalinos, cloruro y sulfuros que causan problemas de suciedad en las rutas y en piezas móviles (Bébar, Stehlík, & Havlen, 2005).

Un sistema típico de gasificación con recuperación de energía se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Esquema general del proceso de gasificación.



Fuente. (Bébar, Stehlik, & Havlen, 2005)

Inicialmente los residuos son triturados y homogenizados para luego ser llevados al reactor de lecho fluidizado. Este consiste en la mezcla del residuo con el material inerte (arena o caliza) que es suspendido en un flujo ascendente de corriente de aire. En el proceso tienen lugar reacciones endotérmicas y exotérmicas. Si el proceso está controlado (a temperatura constante) el calor aportado por las reacciones exotérmicas (combustión) compensa el calor absorbido por las reacciones endotérmicas, lo cual lo convierte en un proceso autotérmico.

Inmediatamente después del reactor se instala un ciclón de alta eficiencia para la recuperación de material particulado. El gas producido en el gasificador es llevado a la cámara de oxidación para mejorar la eficiencia en la combustión produciendo menor volumen de gas, requiriendo de esta manera, equipos más simples para su limpieza (Arena, Di Gregorio, & Amorese, 2011).

Las dos últimas etapas corresponden a la recuperación energética y limpieza de gases (Van Caneghem, y otros, 2012). La recuperación energética es a través de la generación de vapor llevado hacia una turbina de vapor. Los gases por su parte son tratados a través de sistemas de absorción y adsorción para remover los gases ácidos y metales pesados, y un filtro de mangas para remover el material particulado residual (Arena, Di Gregorio, & Amorese, 2011).

Además del sistema de lecho fluidizado se usan los reactores de parrillas móviles, propuesto por ENERGOS, Norway, Germany y UK, 2004), donde la conversión térmica tiene lugar en dos etapas: la gasificación del residuo y la oxidación a alta temperatura del syngas producido en la cámara primaria (Arena, 2012).

Por su parte, los gasificadores de lecho fluidizado se alimentan con residuos de pequeño diámetro (10mm-30mm) mezclados con el material inerte (arena o caliza) (IDAE, 2011) y posteriormente suspendido en un flujo ascendente de corriente de aire que genera una turbulencia que facilita la gasificación, la transferencia de calor y la mezcla uniforme de los residuos (Van Caneghem, y otros, 2012). El reactor opera a temperaturas de 900 °C para evitar la fusión del material inerte. En este tipo de gasificadores, no hay partes móviles por ende el mantenimiento es simple y menos costoso (Arena, 2012).

Para un buen funcionamiento del sistema del lecho fluidizado se recomiendan mezclas de residuo con bajo poder calorífico como los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Van Caneghem, y otros, 2012) y otras sustancias con alto contenido de humedad.

Otros equipos usados para la gasificación de los residuos son los hornos rotativos que por el movimiento de los sólidos dentro del tambor permite la mezcla y la distribución del calor durante la reacción. TAKUMA es una de las firmas más importantes en Japón que desarrolla la tecnología de gasificación en hornos rotativos.

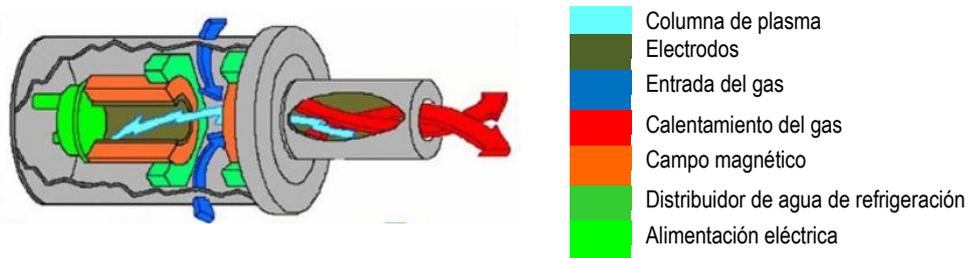
Además de la valorización energética a partir de residuos sólidos, la gasificación es también está ampliamente aplicada para biomasa (Swanson, Platon, & Satrio, 2010), cascarilla de arroz (Calvo, Gil, Otero, & Morán, 2012) y plásticos (Wu & Williams, 2000).

2.4.1.4. Gasificación por plasma

La tecnología de gasificación por plasma no es nueva pero sí su aplicación en el tratamiento y disposición final de residuos para la generación de energía (Yang, Wang, & Wong, 2011). Dentro de los residuos estudiados están: los suelos contaminados, los residuos peligrosos, y los residuos radioactivos de bajo nivel (Gomez & R., 2009).

El plasma se considera como el cuarto estado de la materia. Se forma pasando una descarga eléctrica a través de un gas como aire u oxígeno (Figura 4). La interacción del gas con el arco eléctrico, disocia el gas en iones y electrones, causando un incremento en la temperatura (6.000°C) que funde las sustancias inorgánicas y se destruyen térmicamente las orgánicas (Moustakas, Fatta, Malamis, & Haralambous, 2005).

Figura 4. Antorcha usada para la generación del plasma



Fuente. The Westinghouse Plasma Corporation (WPC)

El aporte continuo de energía provoca el mantenimiento de las elevadas temperaturas en el plasma. El uso de la electricidad permite un mejor control en el proceso. Es una de las formas de energía más costosas (Yang, Wang, & Wong, 2011).

The Westinghouse Plasma Corporation (WPC), desde hace 30 años con la Nasa ha desarrollado la tecnología de gasificación por arco plasma. Actualmente está siendo aplicada a diferentes proyectos como: Yoshi, Syngas & Mihama Mikata, Japón; Utashinai, Japón; Pune, India; Teesside, UK. (Westinghouse). Este tipo de tecnología es también desarrollado por Plasco Energy, Canadá (Arena, 2012).

En el proceso de gasificación por plasma se obtiene: I) gas de síntesis valorizable para la generación de vapor y energía o materia prima para procesos de producción de etanol o gasolina y II) sólidos inertes, no lixiviables, vitrificados (Wang, Yan, Tu, & Chi, 2009) susceptibles de aplicaciones industriales. Lo anterior hace que el proceso sea interesante para la valorización energética de los residuos, sin embargo, es una tecnología costosa, además, según el IDAE⁸, es un proceso que actualmente, para el tratamiento de residuos, se encuentra en fase de prueba, no es clara la viabilidad económica para la disposición de residuos a gran escala, siendo el principal obstáculo para el crecimiento de la tecnología. (Yang, Wang, & Wong, 2011).

⁸ IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía.



2.4.1.5. Coprocesado

El co-procesado se define como la destrucción térmica de un residuo junto a un combustible convencional en un hogar o un horno. El proceso se crea para regularizar el uso de combustibles residuales en hornos de proceso (Castells, 2005), sin embargo, no todos los residuos son apropiados para el proceso ya que puede existir contaminación con elementos que puedan impactar en la calidad del producto industrial (Bontoux, 1999).

Algunos ejemplos de instalaciones de co-procesado son: las plantas de electricidad, vapor, acerías, etc. La capacidad de sustitución de combustibles en estas plantas es aproximadamente el 5-10% a diferencia de los hornos de clínquer y cal que alcanzan el 50% de sustitución, viéndose esto reflejado en los costos operativos (Vermeulen, Caneghem, Block, & Dewful, 2012).

Hornos Clínquer

Los clínquer son hornos rotatorios que pueden llegar a 300 metros de longitud y 8 metros de diámetro. Gira a velocidad importante para lograr turbulencia en su interior y poder generar y completar reacciones. El exterior es un cilindro metálico y el interior tiene una capa aislante y material refractario.

Una de las principales características de los hornos de fabricación de clínquer es la incineración de casi todo tipo de combustibles orgánicos residuales. En este, los elementos contaminantes como hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos clorados y metales pesados se destruyen. (Martínez, 2006).

Para la valorización energética en hornos de cemento, los combustibles alternativos, en este caso residuos generados de la actividad hidrocarburífera, deben ser examinados teniendo en cuenta las siguientes propiedades:

- El estado físico del combustible
- La toxicidad (compuestos orgánicos, metales pesados)
- La composición en elementos problemáticos para la corrosión y escorificación (Na, K, Cl, S) y contenido de cenizas
- El contenido de volátiles
- El poder calorífico
- Las propiedades físicas (tamaño de partícula, densidad, homogeneidad)
- Las propiedades de molienda
- El contenido de humedad

En Argentina, a pesar de que no existan especificaciones de la metodología en el marco normativo del decreto N° 831/93, reglamentario de la Ley Nacional N° 24051/91, es una tecnología desarrollada y cuenta con una habilitación específica. Las empresas Loma Negra y Holcim (Juan Minetti hasta el 2011) son las únicas que hacen recepción de residuos peligrosos en el país. Para la provincia del Neuquén, área de estudio, existe la planta de Zapala (Loma Negra) que hace recepción solamente de residuos combustibles líquidos, como el aceite.

2.4.1.6. Microondas

Proceso por el cual se aplica una radiación electromagnética de corta longitud de onda a una frecuencia característica. La energía irradiada a dicha frecuencia afecta exclusivamente a las moléculas de agua que contiene la materia orgánica. (Ministerio de Salud, Perú). En general estas moléculas están orientadas al azar, sin embargo cuando se les aplica un campo eléctrico se orientan de acuerdo con la polaridad del campo provocando cambio en sus niveles de energía manifestados a través de oscilaciones a alta frecuencia. Las moléculas de agua al chocar entre sí friccionan y producen calor elevando la temperatura del agua contenida en la materia, causando la desinfección de los desechos.

Este sistema de desinfección está basado en la trituración de los residuos y posterior calentamiento interno de la masa triturada mediante la aportación de microondas.

Durante el proceso de trituración se añade agua que, gracias a la acción de los microondas, se calienta y convierte en vapor que humedece la masa de residuos contribuyendo a su desinfección. Durante 25 minutos debe alcanzarse una temperatura de 100 °C en el interior de la cámara de tratamiento. El producto final tratado está preparado para ser depositado en el relleno sanitario o ser enviado a plantas de reciclaje y aprovechamiento de residuos. El volumen de los residuos se reduce en un 60%.

La tecnología de microondas se emplea en sistemas modernos de tratamiento de los residuos infecto-contagiosos provenientes de hospitales y clínicas. Otros usos son el secado de lodos generados en los tratamientos de aguas residuales, secado en la industria de alimentos, tratamientos médicos, entre otros procesos de bajas temperaturas. La metodología no ha sido implementada para procesos de altas temperaturas. (Dorn, y otros, 2015), sin embargo, aplicando la tecnología al tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera, tema que ocupa ésta investigación, se puede usar como una metodología complementaria previa al tratamiento.



El secado asistido por microondas acelera el secado (entre el 60 – 98 % respecto al secado con aire caliente) necesario para alcanzar la humedad óptima requerida en los procesos de pirólisis y gasificación, acelerando el proceso y mejorando el rendimiento.

2.4.1.7. Vitrificación

La vitrificación es el proceso de fusión a temperaturas de 1270 °C y 1450°C en la que el material, en este caso residuo, desarrolla una estructura vítrea capaz de integrar todos los metales presentes. Esta integración se realiza en la red vítrea pero a nivel atómico, de ahí que los metales no tengan ninguna forma de lixiviar (Castells, 2005). El proceso se usa como método de inmovilización de contaminantes para el tratamiento de residuos principalmente inorgánicos de elevada peligrosidad permitiendo el reciclado de los pasivos generados en los sistemas de tratamiento térmico (G.R.M Enviroment S.A., 2008).

Un ejemplo de los procesos de vitrificación es el desarrollado por ScanArc Plasma Technologies AB, Suecia, conocido como VITROARC[®]. En este proceso se genera un material que cumple con los requerimientos exigidos para el uso en construcción. Este modelo de vitrificación es aplicado al tratamiento de cenizas generadas en los procesos de incineración de residuos usándose como metodología complementaria en los sistemas de tratamiento térmico.

Actualmente, la vitrificación no tiene un amplio desarrollo en el país, esto se puede atribuir al alto consumo energético y por ende incremento en los costos operativos para mantener altas temperaturas y fundir el material inerte. En Argentina existe una planta tratadora de residuos⁹, donde las cenizas generadas en el proceso son transformadas en material vítreo.

2.4.2. Aplicabilidad de los Sistemas Térmicos para el Tratamiento de Residuos Peligrosos Generados en la Industria Hidrocarburífera.

Previo al análisis de los aspectos económicos, ambientales y sociales de los diferentes sistemas térmicos se hace una revisión de la aplicabilidad técnica de cada una de las metodologías de tratamiento de los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.

⁹ Planta de tratamiento de residuos aeropuerto EZEIZA.



- La incineración, la pirólisis, la gasificación y la gasificación por plasma son tecnologías aplicables para el tratamiento térmico de los residuos que ocupa esta investigación. Las tecnologías mencionadas cumplen con el objetivo de eliminación de las características peligrosas y reducción del volumen de los residuos. Así mismo, el equipo utilizado para el desarrollo de la tecnología térmica se puede diseñar de tal manera que se aproveche el poder calorífico de los residuos sin alterar los materiales de las cámaras de combustión.
- La aplicación de la tecnología del co-procesado es viable para los residuos generados en la actividad hidrocarburífera, sin embargo depende de las restricciones de recepción de residuos que tenga la planta de procesamiento y de la distancia (km) de la instalación vs el lugar de generación.
- Por último, las tecnologías de vitrificación y microondas pueden usarse como procesos complementarios al tratamiento. La vitrificación se usa principalmente para las cenizas generadas en las cámaras de combustión y la tecnología por microondas se puede aplicar en el secado de los residuos con el fin de acelerar y mejorar el rendimiento del proceso térmico seleccionado.

Se concluye entonces que la vitrificación y la tecnología por microondas no son técnicamente aplicables al tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. De acuerdo a lo anterior, estas metodologías no se incluyen en la evaluación de los sistemas de tratamiento térmico, esto quiere decir que se continúa con el análisis ambiental, económico y social de los procesos de incineración, pirólisis, gasificación, gasificación por plasma y co-procesado.

2.4.3. Aspectos Técnicos, Ambientales, Económicos y Sociales de los Sistemas de Tratamiento Térmico

Una vez realizada la revisión bibliográfica de cada una de las metodologías de tratamiento térmico se hace un análisis de los criterios; técnico, ambiental, económico y social, aspectos importantes en la selección del sistema de tratamiento de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.

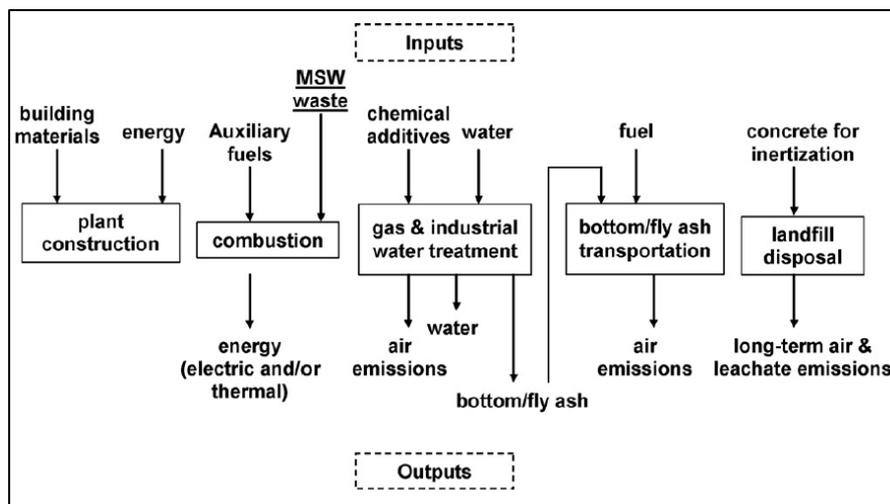
2.4.3.1. Aspecto Ambiental

La metodología LCA (Life Cycle Assessment) ha sido útil para la evaluación de los impactos causados por los sistemas de manejo de residuos. La normalización internacional ISO 1440-43 define la LCA como una compilación y evaluación de las entradas y salidas y los impactos potenciales generados a través del ciclo de vida (Arena, Mastellone, & Perugini, 2003).

Para la apreciación de los impactos ambientales, Morselli, (2008) elaboró un esquema de flujos de entrada y salida en un sistema de incineración (Figura 5).

Se realizará el análisis de las salidas de la fase operativa basada en el diagrama de flujo, para el análisis ambiental de los sistemas de tratamiento térmico. Dentro de las salidas se consideran importantes: la generación de emisiones, la generación de agua residual, la producción de cenizas y la generación de energía.

Figura 5. Diagrama de flujos en un proceso de incineración



Fuente. (Morselli, Robertis, Luzi, & Passarini, 2008)

Emisiones.

Las emisiones de los procesos de combustión están en función de la composición de los residuos y del proceso térmico seleccionado (Riber, Bhandar, & Christensen, 2008).

Comparado con la incineración, la gasificación genera menores cantidades de gas de combustión (Bébar, Stehlík, & Havlen, 2005). En la incineración, la gran cantidad de aire primario crea un volumen importante de gases y por ende una alta velocidad con el consiguiente arrastre de material particulado dentro y fuera de los equipos de tratamiento térmico (Castells, 2005).

Las características contaminantes del gas de emisión y el material particulado dependen en gran medida de las temperaturas y de la adición de aire en la reacción. El gas generado en la incineración contiene contaminantes como: NO_x , SO_2 , HCl, metales pesados y mayor probabilidad de presencia de dioxinas y furanos¹⁰. En la gasificación los contaminantes son: H_2S , HCl, NH_3 , HCN, CO, álcali y material particulado. En la pirólisis se tienen gases como: H_2S , HCl, NH_3 , HCN, alquitrán y material particulado. Los gases de pirólisis tienen una proporción de hidrocarburos muy superior a los que proceden de la gasificación y la incineración, este proceso no provoca importante emisión de dioxinas y furanos debido a que se genera en ausencia de oxígeno.

La formación de dioxinas y furanos es uno de los aspectos más importantes en la incineración de los residuos. Se lleva a cabo en la zona de post-combustión a través de partículas depositadas en los tubos y paredes de los equipos del sistema de recuperación energética o en los equipos de colección de partículas del sistema de tratamiento de emisiones, donde permanecen bajo una temperatura ideal ($200^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$) para su formación (Adrian & Paul, 2009).

Las técnicas de control para evitar la formación de dioxinas y furanos se basan en el control de la temperatura, el tiempo de residencia, la eficiencia de combustión (cantidad de CO producido), en la identificación de aquellos compuestos con alto contenido en cloro orgánico y en la dosificación de los mismos de manera tal de no superar un cierto porcentaje en la carga del sistema de tratamiento térmico.

En la gasificación, debido a la atmósfera reducida, las emisiones de dioxinas y furanos son fuertemente limitadas (Arena, 2012). En este proceso, la mayoría de sustancias generadas son en sus formas reducidas o menos oxidadas tales como: CO en vez de CO_2 , H_2 en lugar de H_2O y otros elementos H_2S en vez de SO_2 y NH_3 o HCN de NO u otros óxidos. Además de la ausencia de una atmósfera oxidante elimina uno de los pasos del mecanismo de síntesis de dioxinas. Los productos de la gasificación pueden limpiarse y depurarse más fácilmente que los procedentes de la incineración. El volumen de gases es

¹⁰ Las dioxinas son miembros de la familia de los compuestos orgánicos conocida con el nombre de policloro-dibenzo-dioxina (PCDD). Los furanos por su parte, son miembros de la familia de los policloro-dibenzo-furanos (PCDF).



mucho menor al igual que la concentración de contaminantes, con lo cual los sistemas de depuración son más pequeños y actúan de forma más eficiente. Un ejemplo es el sistema de lechos fluidizados, tecnología ampliamente usada en el proceso de gasificación. En este sistema, la generación de SO_2 es mínima por la adición de reactivos en el propio lecho (carbonatos). (Van Caneghem, y otros, 2012). Leuschke, et al., (2008) ha demostrado la desulfurización de la corriente de gas, basado en la conversión de hidróxido de calcio con SO_2 a sulfito o sulfato de calcio. Por otro lado, los niveles de NO_x son más bajos que la incineración al trabajar a menores niveles térmicos y excesos de aire más reducidos. Para este sistema de horno, el arrastre de partículas es elevado debido a las condiciones de operación, por lo que generalmente a la salida se suele disponer un ciclón que permiten retener partículas de 5 – 10 μm .

La tecnología de gasificación por plasma genera ciertas emisiones resultantes del proceso de arco de plasma producidas principalmente durante la limpieza del syngas previa a la combustión en turbina. También se pueden producir emisiones al convertir el syngas en productos industriales o en la limpieza de filtros y maquinarias. La principal ventaja de esta nueva tecnología consiste en la total eliminación de los elementos organoclorados (dioxinas y furanos) y la reducción de CO_2 , principal causante de efecto invernadero.

El proceso de gasificación por plasma controla la cantidad de oxígeno y permite que exista solamente el oxígeno suficiente para producir monóxido de carbono. La materia orgánica se transforma en un gas combustible compuesto por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). Solamente se libera una pequeña cantidad de energía cuando se combinan las moléculas de carbono y oxígeno. El monóxido de carbono aún contiene una energía química considerable y puede ser utilizado de muchas maneras. Debido a las altas temperaturas y la falta de oxígeno, no hay alquitranes, dioxinas o furanos, y los niveles de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x) son mucho más bajos.

En el co-procesado, las emisiones a la atmósfera provienen del proceso de combustión dentro del horno de cemento y tienen su origen en las reacciones químicas y físicas de la calcinación de las materias primas. El paso de los gases de combustión por los ciclones, donde transmiten parte de su calor a la harina cruda descarbonatada, produce un efecto de lavado de gases.

Sistemas de depuración

Los sistemas de depuración están en función del estado físico del contaminante, es decir, si el contaminante a separar en el gas portador está en

forma de partículas o en forma gaseosa. Con base en esta clasificación existen los métodos de separación de partículas (cámara de sedimentación, ciclones, filtros de mangas, precipitadores electrostáticos.) y los métodos de separación gaseosa (adsorción, adsorción y sistemas de reducción) (Cuadro 3)

La primera decisión está relacionada con la selección del sistema por vía húmeda o vía seca. El tratamiento en seco está diseñado para separar el material particulado y el tratamiento vía húmeda puede usarse para la separación simultánea de gases y partículas. Con respecto a la separación vía seca, los métodos están determinados por el tamaño de las partículas. Partiendo de la premisa que las partículas menores a 1 μm son nocivas para la salud, no se selecciona la cámara de sedimentación ni los ciclones como tratamiento de material particulado. Sin embargo, las cámaras de sedimentación y los ciclones se usan como un primer tratamiento donde separan de la corriente de gas tamaños de partícula mayores (10-50 μm) con el fin de evitar la colmatación y por ende la pérdida de eficiencia de los sistemas de tratamiento posteriores.

Cuadro 3. Sistemas de tratamiento de emisiones

Ítem	Cámara de sedimentación	Ciclón	Filtro de mangas	Precipitador electrostático	Lavador (scrubber)	Adsorción	Reducción
Naturaleza del contaminante	MP	MP	MP	MP	MP y gases	COV-olores	NO _x
Tamaño de partícula	25 μm	5-20 μm	0,02 μm	0,05 μm	0,1 μm	N/A	N/A
Generación de residuos secundarios	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Agua residual	Sólido (p ej. carbón activo)	Ninguno
Temperatura de operación	Alta (1000°C)	Alta (1000°C)	Baja (250°C)	Alta (650°C)	Altas	Altas	Altas

Fuente: Elaboración propia

MP: Material Particulado

Los tratamientos por vía seca que separan menor tamaño de partícula (< 0,1) son los filtros de manga y los precipitadores electrostáticos. La principal diferencia entre estos sistemas es la temperatura de operación. Los filtros de mangas operan a una temperatura del gas de 250 °C y los precipitadores electrostáticos a 650°C. Sin embargo, si se instala un intercambiador de calor



o caldera prirotubular para disminuir la temperatura, se pueden usar los dos métodos, lo cual influye de forma directa en el costo de inversión, operación, mantenimiento y control.

Con respecto a la separación por vía húmeda, se analiza si el lugar donde se emplazará la planta de tratamiento de residuos peligrosos tiene disponibilidad de área para la instalar el tratamiento de aguas residuales industriales, si hay lugar para el posible vertido del efluente tratado y si no existen inconvenientes con la captación del recurso hídrico. Cumpliendo los requerimientos, se puede optar por la metodología de absorción, donde los lavadores (scrubbers) son usados para la separación de material particulado con mayor eficiencia en tamaños de partículas de $0,1 \mu\text{m}$ y gases (COV, NO_x, H₂S, HCl, Cl₂). Generalmente, en los lavadores, además de la zona de contacto líquido-gas, debe existir la zona de separación sólido-líquido, de la cual los ciclones forman parte.

Por otro lado, existen diferentes métodos para el tratamiento de gases por separado. Por ejemplo, para el tratamiento de los NO_x, se usan los métodos de reducción y para el tratamiento de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), H₂S, SO_x, HCl entre otros, pueden tratarse por medio de la adición de reactivos por vía seca.

Agua residual industrial

La generación de aguas residuales en la incineración y gasificación no está directamente relacionada con el sistema de tratamiento térmico sino con la limpieza por vía húmeda de los gases. El agua contiene muchos contaminantes solubles y no solubles como: ácido acético, azufre, fenoles y otros compuestos orgánicos. La fracción insoluble, por su parte está formada principalmente por alquitrans.

En el caso de la pirólisis, existe generación de agua como producto del proceso de destilación destructiva. La gasificación por plasma genera el agua usada en el enfriamiento del material vítreo.

Existen otras fuentes generadoras de agua residual industrial asociadas a una planta de tratamiento térmico, un ejemplo de ello es el agua captada de los lixiviados en el foso de recepción de los residuos, mantenimiento de la planta, lavado de vehículos, entre otros.

Cenizas

La ceniza es un contaminante peligroso que requiere especial atención desde el punto de vista ambiental y social (Tavares, Zsigaiova, & Semiao, 2011).

En los sistemas de tratamiento térmico se conocen dos tipos de cenizas: las generadas en la cámara de combustión y las cenizas volantes. Las cenizas volantes se definen como las partículas que son arrastradas por el flujo de gases de combustión, están en función del tipo de residuo, de la clase de horno y del tratamiento de gases. La producción oscila entre el 1 y el 5 % del peso del material entrante (Sabbas, y otros, 2003) y contiene gran cantidad de metales pesados (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb y Zn).

Otro material que está presente en la ceniza es la escoria que se define como los materiales sólidos inquemados o inertes que se extraen de la cámara de combustión, cuya cantidad dependerá de la caracterización del residuo. Las escorias son una mezcla heterogénea de metales, vidrios, piedras, cerámica, escombros, material sin quemar, etc. Es un material básicamente alcalino, compuesto de elementos como: óxidos de Si, Ca, Na, Al, Fe, Mg. Otros elementos son: K, Cl, S, Pb, Sn, As, Cd, Hg, Cu, Ni. Los metales ferrosos, pueden ser recuperados y usados como materia prima para otras actividades.

En un estudio realizado por (Phonghiphat, Ryu, Finney, Sharifi, & Swithenbank, 2011), se analizaron las cenizas generadas en la incineración en masa. Se tomaron muestras de la ceniza de la cámara de combustión, del sobrecalentador, del intercambiador de calor de la ceniza, del equipo de mezcla de carbón activado y cal, y del filtro de mangas. Los resultados mostraron bajas concentraciones de volátiles en la ceniza de la cámara de combustión y así altas cantidades de hierro y cobre. El sobrecalentador contiene altas cantidades de sulfuro y algunos metales volátiles tales como zinc. Las partículas depositadas en el intercambiador de calor y el filtro de mangas incrementa la concentración de los metales alcalinos, aparecen elementos volátiles concentrados tales como Cd y As. El Pb y el Zn fueron encontrados pero en menor cantidad.

Las cenizas volantes de los sistemas de tratamiento de gases de la incineración de residuos son una fuente importante de dioxinas y furanos (Stanmore, 2004). Es por ello que la ceniza volante de los procesos de incineración y pirólisis hace parte de la lista de residuos peligrosos establecidos en la Unión Europea (1994).



La producción de diferentes tipos de cemento (coprocesado) usando ceniza volante como uno de las materias primas para su producción es una posible técnica de disposición (Pradip, 2004). Otra técnica es la vitrificación que ha sido objeto de diferentes estudios (Appendino, Ferraris, Matekovits, & Salvo, 2004), (Lin, Wang, Tzeng, & Lin, 2004), (Monteiro, Alendouro, Figueiredo, Ferro, & Fernandez, 2006), sin embargo, la celda de seguridad es la opción de manejo más ampliamente usada.

En la gasificación, la escoria es el principal sólido del proceso cuyo volumen está en función de la cantidad de material mineral presente en la alimentación de los residuos. Cuando se realiza a temperaturas mayores de la temperatura de fusión del material mineral, la escoria pasa a un producto vitrificado que podría pasar el ensayo TCLP (Toxic Characteristics Leaching Procedure) y se clasificaría como un residuo no peligroso para la disposición en un relleno sanitario. Las cenizas generadas en el proceso de gasificación pueden ser usadas como materia prima para la producción de cerámica estructural.

La pirólisis es una tecnología que no elimina los residuos si no que los transforma en carbón, partículas, metales pesados y cenizas. De las tecnologías evaluadas es la que mayor generación de cenizas y escoria tiene. El tratamiento térmico a través de la tecnología de gasificación por plasma no genera cenizas en su reactor. Los componentes metálicos y minerales de los residuos son convertidos en slag derretido gracias a las altas temperaturas en la base del reactor de gasificación. La intención de este proceso es la de reciclar el slag vitrificado como material agregado para aplicaciones de construcción.

En el co-procesado no hay generación de cenizas debido a que quedan encapsuladas en el proceso de fabricación del clínquer.

Aprovechamiento energético

La característica de valorización energética de los residuos está relacionada principalmente con el aprovechamiento de la energía generada por los gases producidos en los diferentes procesos térmicos, llamado también cogeneración.

Los sistemas de cogeneración se basan en la utilización de diversos tipos de máquinas con las que se obtiene energía mecánica (o eléctrica) y térmica a partir del uso de combustibles.

Como componentes básicos de un sistema de cogeneración se pueden citar:



- Máquina motriz, que puede ser turbina de gas y turbina de vapor, las más usadas en el aprovechamiento de energético de residuos.
- Sistema de recuperación de calor.
- Generador de energía eléctrica (alternador).
- Sistema de control.
- Redes de transporte de las energías producidas.
- Conexión a la red eléctrica.

La turbina de gas es una máquina rotativa de combustión interna accionada por la expansión de los gases de la combustión. Los principales elementos que componen una turbina de gas son el compresor, la cámara de combustión y la misma turbina. En la operación de una turbina de gas, el aire se aspira de la atmósfera se comprime en el compresor y se introduce en la cámara de combustión mezclándose con el combustible, produciendo la ignición. Los gases calientes obtenidos en la combustión se hacen circular por la turbina y al expandirse, permiten accionar, además del propio compresor, un alternador u otra máquina.

La turbina de vapor es una máquina rotativa que aprovecha una parte de la energía contenida en este fluido (a niveles de presión y temperatura determinados), transformándola en trabajo útil del cual se puede disponer en forma de par motor en un eje. Los principales elementos son: caldera, turbina de vapor, alternador, condensador y bomba de recirculación.

Existen también los denominados ciclos combinados. El más usual es la combinación de turbinas de gas y turbinas de vapor con una eficacia inherente superior a cada uno de los sistemas simples por separado. En esencia el ciclo combinado estriba en una turbina de gas que genera electricidad. Los gases calientes efluentes producen vapor en una caldera que, a su vez, se envía a una turbina de vapor que produce más electricidad.

Desde el punto de vista de la valorización energética de residuos, la turbina de vapor es la máquina por el momento más usada (Castells, 2005).

Cogeneración en los sistemas de tratamiento térmico

Una amplia variedad de tecnologías son usadas para la producción de energía. Las principales tecnologías de conversión termoquímica a partir de del tratamiento de residuos más conocidas son: la incineración o combustión directa, pirólisis y gasificación. Otra tecnología que se está estudiando actualmente es la gasificación por plasma.

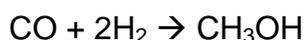
En la incineración, el calor generado es convertido en vapor que pasa luego a un sistema de turbina para generar electricidad o usado directamente para suplir calor a industrias o edificaciones cercanas. Las calderas de las plantas modernas de incineración alcanzan una eficiencia del 85%, sin embargo, operan en condiciones más bajas que las plantas de energía debido a factores como la corrosión causada por el alto contenido de Cl de la mayoría de los residuos combustibles, y la alta concentración de cloruro resultante de la ceniza depositada en los tubos de la caldera. De esta manera la eficiencia energética pasa a un 22-25% (Murphy, 2004) (Xiao, Baosheng, Honchang, Zhaoping, & Mingyao, 2007).

El aprovechamiento energético a partir del proceso de incineración requiere una alta frecuencia en el mantenimiento de los equipos y además la vida útil del equipamiento es generalmente menor comparado con las otras tecnologías. La implementación de la recuperación energética en los sistemas de incineración ha incrementado, como lo demuestra el estudio del WTER¹¹ (2007), donde la capacidad global de la incineración de residuos con recuperación de energía aumentó en aprox. 4 Mton/año en el periodo 2001-2007 (Van Caneghem, y otros, 2012).

La experiencia muestra que la recuperación energética en plantas de incineración, para una cantidad inferior a las 120.000 t/año, resulta problemático. Esta metodología suele ser económicamente interesante cuando se tratan más de 120.000 t/año.¹² Lo anterior es indispensable al momento de tomar la decisión de generar energía a partir del tratamiento térmico de los residuos.

El proceso de gasificación y gasificación por plasma, por su parte ofrecen mayores posibilidades de recuperar el valor energético de los residuos, donde el syngas o gas de síntesis puede ser configurado para emplear sistemas de conversión energética más eficientes tales como motores y turbinas de gas y por lo tanto tener mejores eficiencias de generación eléctrica (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009).

El syngas consiste principalmente de CO y H₂ con una pequeña cantidad de CH₄ y cadenas cortas de hidrocarburos. Cuando estos gases se introducen en un convertidor catalítico se produce la siguiente ecuación:



¹¹ Waste to Energy Research and Technology Council

¹² Tomado el 04/12/2013 <http://www.gestion-calidad.com/residuos.html>

En la reacción se forma alcohol metílico que tiene un alto poder calorífico (5300 kcal/kg) y permite ser usado como combustible (Castells, 2005).

El principal aspecto del syngas es el grado de limpieza y el poder calorífico del gas que pueden reemplazar los combustibles para la generación de energía a través de turbinas de vapor o turbinas a gas y unidades de ciclo combinado que les permite tener una mayor eficiencia de generación eléctrica y por ende un mejor rendimiento en el sistema global que los procesos de incineración donde generalmente usan turbinas de vapor (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009). El syngas puede usarse para mayor eficiencia en la producción de electricidad (34%) y/o calor (40%) (Münster & Mebom, 2010) (Xiao, Baosheng, Honcang, Zhaoping, & Mingyao, 2007). Por ejemplo, para el ciclo combinado, la gasificación en lecho fluidizado reporta eficiencias del 24% - 27% para 50-100 kton/año respectivamente. Con motores de gas 23% - 25%, mientras que los sistemas de incineración reportan un 18% - 22% (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009).

La energía térmica generada en el proceso de gasificación puede ser recuperada y utilizada para usos convencionales, por ejemplo para la alimentación a una red de calefacción, la producción de electricidad o el suministro de vapor a la industria. Los sistemas de gasificación incrementan la eficiencia energética del 6 – 10% mientras que los sistemas de incineración incrementan en un 22% duplicando la capacidad de la planta (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009), quiere decir que la gasificación tiene aplicación para la generación energética a pequeñas escalas (<120 kton/año).

El proceso de gasificación convencional produce un gas combustible similar al producido por el proceso de gasificación por arco plasma, sin embargo es mucho más contaminado y contiene carbonilla. Las temperaturas más bajas de la gasificación convencional no pueden descomponer todos los materiales.

La pirólisis por su parte genera un gas cuya composición es bastante compleja y para su uso directo requiere un importante sistema de limpieza especialmente para la remoción de compuestos de azufre, partículas viscosas y alquitrán.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la energía neta producida por tonelada para cada proceso. Cabe resaltar que el tratamiento de residuos mediante gasificación por plasma representa el proceso que permite la obtención de mayor cantidad de energía (kWh) por tonelada de residuo sólido.

Tabla 2. Energía producida por los diferentes procesos térmicos en el tratamiento de MSW (Municipal Solid Waste).

Proceso [1]	Electricidad Neta [2] (kWh/ton MSW)	Ventaja del Plasma (%)
Gasificación por plasma	816	-
Gasificación convencional Fixed/Fluidized Bed Technologies	685	20
Pirólisis Mitsui R21 Technology	571	40
Incineración Mass Burn Technology	544	50

[1] 300-3,600 TPD de MSW, [2] Potencia generada por la turbina de vapor

Fuente: (Genivar, Ramboll, Whitford, Deloitte, & URS., 2007)

La gasificación asistida por arco plasma se puede utilizar para convertir materiales que contienen carbono en gas de síntesis que se puede utilizar para generar energía y otros productos útiles, tales como combustibles para el transporte. (Mata, 2014)

Existen aproximadamente 305 plantas para la generación de energía a partir de los residuos¹³. En Europa cerca de 50 Mton/año de residuos (2007) son tratados térmicamente con recuperación energética. Dinamarca y Luxemburgo tratan más del 50% de los MSW (Municipal Solid Waste) por incineración en su mayoría con recuperación energética. Así mismo, Francia, Suecia, Países Bajos, Bélgica y Suiza también tienen altas tasas de incineración con recuperación energética (Bogner, y otros, 2007).

Es importante señalar que la decisión de instalar los sistemas de recuperación depende de: la capacidad de la instalación, el PCI de los residuos y el precio de comercialización de la energía.

2.4.3.2. Aspecto Económico

Los costos e ingresos pueden ser usados como indicativos y comparativos de las diferentes opciones de tratamiento térmico y depende de los proveedores, de la escala de la planta, del tipo de tecnología, del sistema de recuperación energética y de los factores del área local (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009).

¹³ Tomado el 03/12/12 de <http://www.industcards.com/>



El modelo económico usado por Arena, et al., (2011) para el análisis económico está basado en los costos totales de la planta, los costos operativos, los impuestos y los ingresos directos por la venta de generación de energía.

Arena (2011), menciona que el costo total de la planta es la suma de los costos del equipamiento (compra de equipos), costos directos (asociados con el acondicionamiento del lugar y el ensamblaje de los componentes) y costos indirectos (asociados con logística e ingeniería).

Los costos operativos son la suma del mantenimiento, consumibles, disposición de residuos, mano de obra y seguro. El transporte es un importante aspecto en el sistema de tratamiento (Tavares, Zsigaiova, & Semiao, 2011). En Europa el transporte de residuos a las plantas de recuperación energética generalmente no exceden los 500 km. (Boughton & Horvath, 2006)

Los ingresos vienen principalmente de la venta de la energía. En Italia, el valor de venta de energía es de 0,062 € por kwh entregados a la red y el valor de 0.065 €/kwh como incentivo de recuperación energética a partir de residuos (Arena, Di Gregorio, & Amorese, 2011). Los ingresos generados por la venta de electricidad son esenciales para la viabilidad económica del sistema. (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009).

Otro aspecto a considerar son los efectos de economía de escala, es decir que la rentabilidad mejora considerablemente con el aumento del tamaño de la planta (Caputo, Palumbo, Pelegagge, & Scachia, 2005). La incineración es adecuada para la aplicación de economías de escala (Tabla 3) principalmente porque este proceso, en pequeñas o grandes plantas, genera un importante volumen de gases que requieren calderas y sofisticados sistemas de limpieza. (Yassin, Lettieri, Simons, & Germana, 2009).

Tabla 3. Costos en una planta de incineración de residuos municipales.

Capacidad	Inversión	Costo de tratamiento
320,000 toneladas/año	142 millones de dólares	60 dólares/tonelada.
150,000 toneladas/año	88 millones de dólares	70 dólares/tonelada.
90,000 toneladas/año	53 millones de dólares	80 dólares/tonelada.

Fuente: (SEDESOL)

La tecnología de co-procesado por su parte, no es comparativa con los sistemas de tratamiento térmico, ya que el tratamiento de residuos sería un

servicio adicional a la planta de fabricación de clínquer. Para el análisis económico de esta tecnología se tiene en cuenta principalmente la distancia de la planta vs el lugar de generación o de acopio de los residuos, lo anterior asociado directamente con los costos requeridos en el transporte del material.

A continuación se muestra un ejemplo de los costos e ingresos asociados para las tecnologías de incineración y gasificación por arco plasma encontrados en la literatura.

Costos e ingresos de la gasificación arco plasma

La información fue extraída del estudio “análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos por plasma”, realizado por la Universidad Pontificia de Comillas¹⁴, Madrid. Los datos de la inversión, los costos operativos y los ingresos corresponden a una planta de arco plasma cuya capacidad es de 200 ton/día de residuos, trabajando durante 330 días al año. Es importante aclarar que estos datos son teóricos puesto que los únicos avances realizados en este campo en el país (España) corresponden a Westinghouse Plasma y se encuentran en estado de aplicación y aprobación de las regulaciones legales necesarias.

Inversión inicial. La inversión inicial incluye los gastos correspondientes a: la gestión del proyecto, trabajo de ingeniería, licencias, adquisición del terreno (40.000 m²) y obra civil que comprende: nave principal donde se instala el proceso principal de gasificación, limpieza y generación de energía, almacenes, administración, áreas auxiliares, instalaciones eléctricas, redes contra incendios, alumbrados etc.

Tabla 4. Costos de inversión inicial para la instalación de una planta de arco plasma.

Ítem	Tota (€)
Estudios, proyecto y primer establecimiento	20.000
Adquisición de terrenos (4 ha)	17.000.000
Obra civil	2.555.000
Maquinaria	36.733.880
Otras inversiones (mobiliario, telefonía)	65.000
Total de inversión inicial	56.373.880

¹⁴ <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4fc5e7a807b17.pdf>



Con respecto a la maquinaria, el equipo de mayor es el sistema de arco de plasma, que tiene un costo de 20.922.640 €, en segunda instancia está el sistema de turbina de gas (8.017.800 €), seguido del sistema de turbina de vapor (4.963.400 €). Por último se encuentra el sistema de limpieza por cuyo costo corresponde a 1.603.560 €.

Costos de Operación. Se representan los costes en los que incurre la planta en su explotación. Los costos directos corresponden a la materia prima requerida para el proceso que requiere de coque metalúrgico y de caliza para su funcionamiento. Los costos indirectos por su parte, tienen en cuenta los consumos eléctricos de la maquinaria y de las instalaciones y los costos fijos están asociados al personal de la planta; para la capacidad estudiada se proyecta la necesidad de 42 trabajadores, cuyo mayor número corresponde a los operarios (25). Por último, los gastos del periodo (año) están relacionados con el mantenimiento de los equipos e instalaciones.

Existen otros costos como son los financieros derivados del préstamo que se utiliza para financiar la inversión inicial.

Tabla 5. Costos operativos para una planta de gasificación por arco plasma. Año de referencia 2012.

Ítem	Total (€/año)
Costos directos	309.355
Costos indirectos	94.061
Costos fijos	795.393
Gastos para un año	415.920
Total de costos de la operación	1.614.729

Ingresos. Están asociados a la recepción de residuos, la venta del slag vitrificado y la venta de la energía eléctrica producida en los sistemas de turbinas de gas y vapor.

Como referencia se tiene que el precio unitario de recepción de residuos es de 115 €/ton. El slag vitrificado para una tonelada de residuo son 0.35 y tiene un precio unitario de 2.25 €/ton. Para la capacidad tratada (66.000 ton/año), la energía vendida corresponde a 61.314 MWh/año, cuyo precio unitario es de 84,10 €/MWh.



Tabla 6. Ingresos generados por la planta de gasificación por arco plasma.

Ítem	Total (€/año)
Recepción de residuos	7.590.000
Slag vitrificado	49.896
Energía	5.156.200
Total	12.796.096

En los ingresos también se puede relacionar la venta de los metales recuperados durante los procesos de separación.

Inversión y costos de la incineración.

Para el análisis económico de la incineración como sistema de tratamiento térmico se tomó la información del estudio realizado en la municipalidad de Guaghan, China (Tang, 2012). La capacidad de la planta es de 400 ton/día de residuos sólidos urbanos, requiriendo un área de 52.800 m².

Costos de inversión. Incluye la adquisición del terreno, el costo de los equipos y la construcción e instalación de la planta (Tabla 7).

Tabla 7. Costos de inversión para una planta de incineración. (2011)

Ítem	Total (€)
Adquisición del terreno	1.230.000
Obra civil y costo de instalación	30.100.000
Equipamiento	71.700.000
Total de inversión inicial	103.030.000

Costos de Operación. En los costos de operación, a diferencia del tratamiento de gasificación por arco plasma, se debe tener en cuenta la disposición de las cenizas en el relleno de seguridad (Tabla 8).

El costo de mantenimiento está asociado con la reparación y mantenimiento de los equipos. El costo anual de mantenimiento de una planta de incineración equivale al 3% de la inversión del equipo.



Tabla 8. Costos operativos para una planta de incineración (2012)

Ítem	Total (€/año)
Costo de mantenimiento	2.146.000
Costos de operación	1.122.277
Costo de transporte y disposición de cenizas	30.100.000
Total de costos operativos	33.368.277

Los costos de operación incluye: los consumos (agua, electricidad y gas), costo del personal, productos químicos, combustible auxiliar, costos administrativos,

Ingresos. Están dados por la prestación del servicio (11.4 €/ton) (Tang, 2012) y por la venta de energía. Para una cantidad de 80.823 ton de residuos se transmiten 16.649.61 kwh. El precio por kwh es de 0.08 €. Lo anterior registraría un ingreso anual de 1.3666.118 €.

La cantidad de energía generada depende directamente del poder calorífico de los residuos. Los residuos urbanos tienen un poder calorífico de 1.291 kcal/kg.

Tabla 9. Ingresos generados por la planta de incineración (2012).

Ítem	Total (€/año)
Recepción de residuos	918.227
Venta de energía	1.366.118
Total de costos operativos	2.284.345

La venta de metales tales como: hierro, aluminio y cobre pueden ser recuperados en los procesos de una planta de incineración. Este ingreso no se tiene en cuenta para el análisis de las tecnologías térmicas para el tratamiento de residuos.

Gasificación y Pirólisis

La gasificación con aprovechamiento de energía tiene costos de inversión y operación más altos que los sistemas de incineración (en orden de un 10%) como consecuencia de agregar complejidad al sistema (Arena, 2012).



El costo de inversión inicial de una planta de pirólisis es aproximadamente igual a la de una planta de incineración y su funcionamiento resulta igualmente costoso; aunque a diferencia de las plantas de incineración, los costos son recuperables en las plantas de pirólisis ya que básicamente todos los subproductos son reutilizables y representan un ingreso potencial.

2.4.3.3. Aspecto Social

El tratamiento térmico de los residuos ha recibido una fuerte oposición debido a que se cree que la incineración pone en riesgo la salud y el ambiente y que es incompatible con el concepto de reducir, reusar y reciclar (Sawell, Hetherington, & Chandieu, 1996). Esto se considera como uno de los principales problemas para la ubicación de una nueva planta (Tavares, Zsigaiova, & Semiao, 2011).

En un informe de la ONG ambientalista Greenpeace sobre la incineración y salud; conocimientos actuales sobre los impactos de las incineradoras en la salud humana (2000), menciona la exposición de las comunidades a productos químicos, bien por inhalación del aire contaminado o por el consumo de productos agrícolas locales (verdura, leche y huevos), o por el contacto directo con el suelo contaminado.

Los efectos de acuerdo a los estudios epidemiológicos sobre la salud de las poblaciones que residen cerca de las incineradoras se han centrado en la incidencia de cáncer o síntomas respiratorios¹⁵. De acuerdo a lo anterior, la comunidad en general considera que las diferentes tecnologías térmicas (gasificación, gasificación por plasma y pirólisis) se tratan de sistemas de incineración encubierto y que por lo tanto, también tiene el peligro de que se formen dioxinas, furanos y otros productos de combustión incompleta que desencadenan procesos cancerígenos. Sin embargo, actualmente se percibe una tendencia de crecimiento en la implantación de instalaciones de gasificación, pirólisis y gasificación por plasma debido a la baja aceptación a nivel social de la incineración, y a la voluntad y expectativa de conseguir una recuperación energética más eficiente.

¹⁵ <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/incineraci-n-y-salud-2.pdf>



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

El objetivo de este capítulo es describir las herramientas que se utilizan para la construcción del modelo de selección de la alternativa más viable. Para ello es necesario conocer los conceptos relacionados con el proceso de toma de decisiones para posteriormente aplicarlo al caso de estudio.

3.1. Proceso de Toma de Decisiones.

La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos. Este proceso se inicia al identificar y definir el problema, y termina con la elección de una alternativa, que es el acto de tomar una decisión.

A los problemas que no implican más de un criterio de decisión se les denomina problemas de decisión de criterio único, y en el caso contrario se les denomina problemas de criterios múltiples o de decisión multicriterio.

3.2. Análisis de Decisión Multicriterio

Se entiende por decisión multicriterio como el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral de los procesos de decisión seguidos por los individuos y sistemas, esto es, a mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión¹⁶.

En un problema de decisión multicriterio se trata de identificar la mejor o las mejores soluciones considerando simultáneamente múltiples criterios en competencia, donde el incremento en la satisfacción de uno implica el decremento de la satisfacción del otro.

¹⁶ http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/02t.pdf

Métodos de Evaluación y Decisión Muticriterio

Los Métodos Multicriterios de Selección y Toma de Decisiones (MMSTD), son métodos o modelos matemáticos que se aplican en la solución de problemas para los cuales existen múltiples alternativas de resolución y múltiples criterios influyen en la decisión final. Este es el caso de tecnologías de proceso, en donde las alternativas son las distintas tecnologías mediante las cuales se puede realizar el proceso y en donde los múltiples criterios (económicos, ambientales, operacionales, seguridad, etc.) influyen en la selección de la tecnología (Alfonso, 2010).

El problema central de los métodos multicriterio consiste en: I) seleccionar la(s) mejor(es) alternativa(s), II) aceptar alternativas que parecen “buenas”, rechazar aquellas que aparecen “malas” y III) generar un orden (ranking) de las alternativas.

En el Cuadro 4 se muestran algunos de los diferentes MMSTD, entre los cuales el Proceso de Jerarquización Analítica (AHP) ha sido seleccionado. La metodología AHP de Saaty (1980) tiene ventajas como: (a) simple en su construcción; (b) adaptable a las decisiones individuales y en grupo; (c) en consonancia con nuestros pensamientos, valores e intuiciones; (d) orientada a la búsqueda del consenso y (e) que no requiera una especialización suprema para su aplicación.

Cuadro 4. Métodos multicriterios de selección y toma de decisiones (MMSTD).

Método	Nombre	Autor	Fecha
PG	Promedio Generalizado	Sin referencia	-
SMART	Simple Multiattribute rating technique (Método simple de tasa multiatributo)	Sin referencia	-
AHP	Analytical Hierarchy Process (Proceso Jerárquico analítico)	Saaty	1980
GRA	Grey Relational Analysis (análisis relacional grey)	Deng	1982
PROMETHEE	Preference Ranking and Organisation Method for Enrichment Evaluation (método de ranking de preferencia y organización para un evaluación enriquecedora)	Brans Vincke	1985
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité (Eliminación y selección expresando la realidad).	Roy	1991
SAT	Aplication of the Sustentainability Assessment of Technologies Methodology: Guidance Manual	United Nations Environment Programme	2012

Fuente: Adaptado de Alfonso, 2010



En los últimos años el método AHP ha sido muy utilizado en varias de las más grandes empresas, en algunos sectores industriales y en regiones territoriales. Algunos de estos estudios son los de Harker (1987), Ávila Mogollón (1996), Escobar y Moreno-Jiménez (1997), Lage-Filho (2004), Osorio, Urbano y Manyoma (2012), entre otros.

3.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process)

Este método fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty en 1980. Es una metodología fundamentada matemáticamente que tiene en cuenta elementos cuantitativos y cualitativos en la solución de un problema. El AHP se ha constituido como una herramienta de soporte para las decisiones, que les permite estructurar de forma adecuada procesos de toma de decisiones complejas, incorporando conceptos y técnicas ya existentes pero que no habían sido asociadas entre sí, como son: las estructuras de complejidad jerárquica, las comparaciones por pares, los juicios redundantes y los métodos de valores propios para obtener pesos y medir consistencias (Saaty, 2001).

El AHP se fundamenta en:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de pesos.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de sensibilidad.

A continuación se hace la descripción de la base matemática y de la metodología del AHP. Para ello se tomó como referencia la investigación de Toskano (2005), cuya terminología facilita la comprensión del método.

3.3.1. Base Matemática del AHP

El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior (Ósorio & Orjuela, 2008).

Establecimiento de Prioridades con el AHP. El AHP, pide a quien toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión en términos de la medida en la que contribuya cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de preferencia global (Toskano, 2005).

Comparación por Pares. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón, propuesta por Saaty (1980), en términos de preferencia, importancia o probabilidad, que van desde 1 hasta 9. En la Tabla 10 se muestra la escala en términos de preferencia.

Tabla 10. Escala de preferencias. Saaty

Escala-Valor	Interpretación
9	A es extremadamente preferible que B
7	A es marcadamente preferible que B
5	A es preferible que B
3	A es ligeramente preferible que B
1	A es igual preferible que B
1/3	B es ligeramente preferible que A.
1/5	B es preferible que A
1/7	B es marcadamente preferible que A.
1/9	B es extremadamente preferible que A.

Fuente. (Castillo, 2008)

Los valores 2, 4, 6, y 8 suelen utilizarse en situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión (Saaty, 1980).

Matriz de Comparación por Pares Se construyen las llamadas matrices de comparación por pares en las que se colocan los elementos en las filas y columnas y se evalúan de acuerdo a la escala propuesta.

Sea **A** una matriz $n \times n$. Sea a_{ij} el elemento (i, j) de **A**, para $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, n$. Decimos que **A** es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma.



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Además se cumple que: $a_{ij} * a_{ji} = 1$; es decir:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

El AHP sustenta esto principalmente con los siguientes axiomas:

- *Axioma recíprocal.* Si frente a un criterio, una alternativa A es n veces mejor que B, entonces B es 1/n veces mejor que A.
- *Axioma de homogeneidad.* Los elementos que son comparados no deben diferir en mucho en cuanto a la característica de comparación establecida.
- *Axioma de la síntesis.* Los juicios acerca de las prioridades de los elementos en una jerarquía no dependen de los elementos del nivel más bajo.

Síntesis. Este paso tiene como objetivo la producción de un vector de pesos compuesto. En él se agregan todos los pesos relativos resultado de la matriz anterior, con el fin de determinar un rango de decisión que permiten alcanzar el objetivo principal (Guerrero, 2002). El procedimiento para sintetizar los juicios se puede resumir en los siguientes pasos:

- Paso 1. Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones.
- Paso 2. Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.



- Paso 3. Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

Matriz de Prioridades. Se considera las prioridades de cada criterio en términos de la meta global:

$$\begin{array}{c} \text{Meta} \\ \text{Global} \\ \text{Criterio 1} \\ \text{Criterio 2} \\ \dots \\ \text{Criterio } m \end{array} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix}$$

Donde m es el número de criterios y P'_i es la prioridad del criterio i con respecto a la meta global, para $i = 1, 2, \dots, m$.

Se denomina matriz de prioridades a la que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas se tiene:

$$\begin{array}{c} \text{Alternativa 1} \\ \text{Alternativa 2} \\ \dots \\ \text{Alternativa } n \end{array} \begin{bmatrix} \text{Criterio 1} & \text{Criterio 2} & \dots & \text{Criterio } m \\ P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , para $i = 1, 2, \dots, n$; y $j = 1, 2, \dots, m$.

La prioridad global para cada alternativa de decisión se resume en el vector columna que resulta del producto de la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \dots \\ P_{gn} \end{bmatrix}$$

Donde P_{gi} es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Consistencia lógica. El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que da el tomador de decisiones. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis.

La consistencia implica lo siguiente:

- Transitividad de las preferencias: Si C1 es mejor que C2 y C2 es mejor que C3 entonces se espera que C1 sea mejor que C3.
- Proporcionalidad de las preferencias: Si C1 es 3 veces mejor que C2 y C2 es 2 veces mejor que C3 entonces se espera que C1 sea 6 veces mejor que C3.

El AHP calcula la relación de consistencia **RC** como el cociente entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde **IC** es el índice de consistencia y se calcula como sigue:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

El λ_{\max} se calcula mediante el siguiente procedimiento:

1. En la matriz de comparación por pares se multiplica cada uno de los valores por la prioridad relativa del primer elemento considerado; se multiplica cada valor de la segunda columna por la prioridad relativa del segundo elemento y así cada columna por el elemento correspondiente. Se suman los valores ubicados a lo largo de los renglones para obtener un vector de valores conocido como suma ponderada.
2. Se dividen los elementos del vector de sumas ponderadas obtenido en el paso 1, entre el valor de prioridad correspondiente.



3. Se calcula la media de los valores encontrados en el paso 2; esta se identificará como λ_{\max} .

IA es el índice de consistencia aleatoria, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada en forma aleatoria. Se puede mostrar que el **IA** depende del número de elementos que se comparan, y asume los siguientes valores:

Tabla 11. Índice aleatorio (Saaty, 2001).

N° de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio de consistencia (IA)	0.00	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Se calcula la relación de consistencia **RC**. Este cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

3.3.2. Esquema Metodológico del AHP

3.3.2.1. Estructuración del Modelo Jerárquico

Una de las partes más relevantes del AHP consiste en la estructuración de la jerarquía del problema, etapa en la cual el grupo decisor involucrado debe analizar los componentes relevantes del problema.

Los pasos a seguir para la estructuración del modelo jerárquico son: I) identificación del problema, II) definición del objetivo, III) Identificación de criterios y IV) identificación de alternativas.

- **Identificación del problema**

Es la situación que se desea resolver mediante la selección de una de las alternativas de las que se dispone o la priorización (ranking) de ellas.



- **Definición del objetivo**

Un objetivo es una dirección identificada para mejorar una situación existente. El objetivo está en un nivel independiente y los otros elementos de la jerarquía que serán los criterios, subcriterios y alternativas apuntan en conjunto a la consecución del mismo.

- **Identificación de los Criterios**

Son las dimensiones relevantes que afectan significativamente a los objetivos y deben expresar las preferencias de los implicados en la toma de decisión.

- **Identificación de las Alternativas**

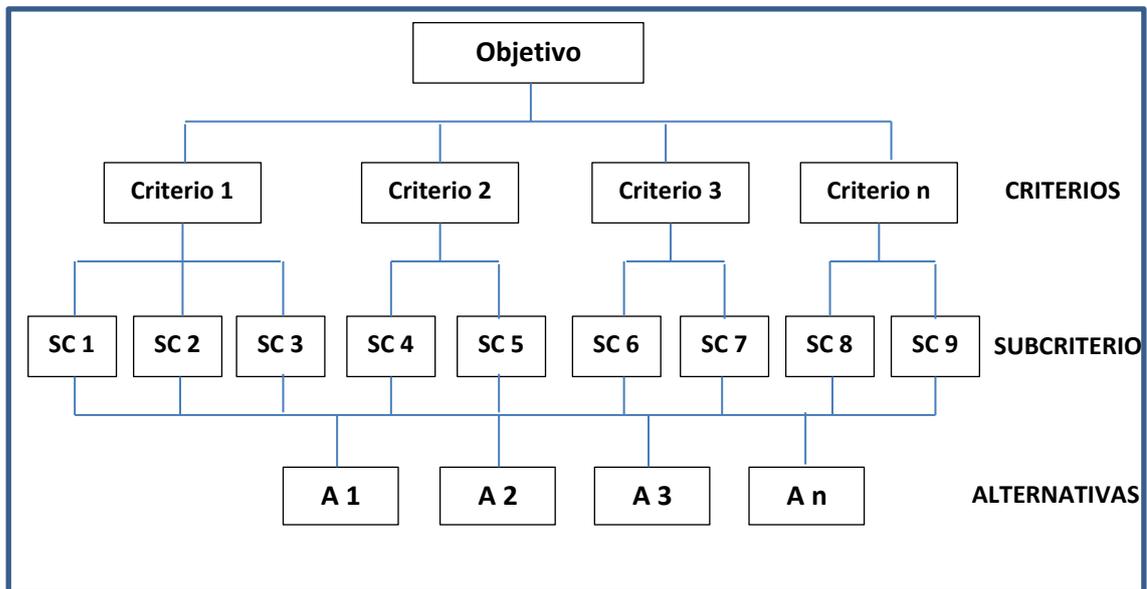
Corresponden a propuestas factibles mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo general. Cada una de las alternativas presenta características positivas y negativas.

- **Árbol de Jerarquías**

Consiste en elaborar una representación gráfica del problema. El modelo jerárquico básicamente contiene cuatro niveles: meta u objetivo, criterios, subcriterios y alternativas. (Figura 6)

1. Meta u objetivo global. Corresponde al problema que se espera resolver. Es el elemento más importante de la jerarquía. En el caso que ocupa esta investigación es seleccionar la tecnología térmica más viable para el tratamiento de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera en la provincia del Neuquén.
2. Criterios o variables principales. Son los elementos que conducen al cumplimiento de la meta.
3. Subcriterios o variables. Son los elementos que se encuentran en niveles inferiores, que también se cuantifican y que a su vez hacen parte de la estructura de composición de la meta.

Figura 6. Jerarquía para la selección de tecnología.



4. Alternativas. Se refiere a las alternativas de solución del problema.

Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad para interpretar los cambios que podrían surgir respecto a las preferencias.

- **Evaluación del Modelo**

En la evaluación del modelo se examinan los elementos del problema aisladamente por medio de comparaciones de pares. Las evaluaciones o juicios son emitidos por cada analista o grupo de interés, estos pueden estar guiados por información científica, técnica, por la experiencia y conocimientos del grupo decisor útiles para evaluar los diferentes componentes del modelo.

Cada persona expresa su preferencia haciendo la pregunta apropiada mediante los términos de importancia, preferencia o probabilidad, asignando un valor numérico (escala de Saaty), que mide la intensidad de su preferencia. Luego se debe encontrar el vector propio asociado al mayor valor propio de la matriz de comparación a pares.



- **Resultado Final**

Una vez realizada la totalidad de comparaciones se obtiene el resultado final consensuado: ordenamiento de las alternativas. Este resultado está basado en las prioridades, en la emisión de juicios y evaluación hecha a través de las comparaciones de los componentes del modelo jerárquico.

Para la aplicación de la metodología descrita existe el software expertchoice, basado específicamente en el Proceso Jerárquico Analítico (AHP, Analytic Hierarchy Process). Este software asiste a los decisores organizando la información relacionada a la complejidad del problema en un modelo jerárquico consistente de un objetivo, escenarios posibles, criterios y alternativas. Usando el método, único de Expert Choice, de comparación par a par, se puede evaluar la importancia de los criterios, las preferencias de las alternativas, y las probabilidades de los escenarios y sintetizar sus comparaciones para llegar a la mejor decisión.

En la presente investigación no se hizo uso del software, todos los cálculos se realizaron a través de la herramienta Microsoft Excel ®. Para ampliar la información acerca del uso del Expert Choice se puede ingresar a la página web: <http://www.expertchoice.com>.



CAPÍTULO IV

4. APLICACIÓN DEL METODO AHP EN LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO TERMICO DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA ACTIVIDAD HIDROCARBURÍFERA DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN

En este capítulo se hace una descripción de la provincia del Neuquén; principal productora de petróleo y gas a nivel nacional. Se tomó como área de estudio debido a la vulnerabilidad relacionada con el tratamiento y disposición final de residuos peligrosos asociados al desarrollo del sector de hidrocarburos. Así mismo, se hace una revisión de los tipos de tratamiento térmico aplicados a los residuos generados en la industria hidrocarburífera de la provincia.

La información identificada en el diagnóstico se utilizó como entrada para la aplicación del AHP (Analytic Hierarchy Process), metodología que brinda la ayuda necesaria para la selección de la alternativa de tratamiento térmico con base en los criterios y subcriterios determinados en el presente capítulo.

4.1. Descripción del Área de Estudio.

Generalidades de la provincia del Neuquén.

La provincia del Neuquén está ubicada en el extremo noroeste de la Patagonia Argentina (Figura 7), cuenta con una superficie de 94.028 km², que corresponden al 3,4% del total de la superficie del país. La capital provincial lleva el mismo nombre de la provincia. La división jurisdiccional establece 16 departamentos con poderes políticos y administrativos propios. La mayor parte de la población se concentra en el departamento donde se encuentran las ciudades de Neuquén, Plottier, Plaza Huincul y Cutral Có. La población de la provincia del Neuquén de acuerdo al último Censo Nacional de Población y Vivienda (INDEC, 2010) es 551.276 habitantes.

La geografía provincial es muy diversa presentando una notable variedad de paisajes, desde cordones montañosos a serranías, mesetas y cerros volcánicos.

La actividad económica provincial se puede dividir entre la extracción de petróleo y gas, la producción agrícola de peras y manzanas, y el turismo



(Secretaría de Industria y Comercio y PYME. Provincia del Neuquén, 2004). Sin embargo, el crecimiento económico se ha consolidado a través de los años en la explotación de los recursos de hidrocarburos y los servicios relacionados con ello.

Figura 7. Ubicación de la Provincia del Neuquén.



Las principales empresas instaladas en la provincia son:

Sector petróleo y gas: Pan American Energy y Petrobrás. Al mismo tiempo un número importante de compañías brindan servicios a este sector, a saber; Baker Hughes Argentina, Alpeco, Lockwood , Production Operators Argentina, Stinger Wellhead Int. Inc y Weatherford.

Sector energía eléctrica: Hidroeléctrica el Chocón (del grupo chileno ENDESA), AES Alicurá Holdings y Piedra del Aguila (del grupo francés Totalfina ELF).

Sector frutícola: Moño Azul y Mario Cervi (frutas frescas). Jugos del Sur y Sower (jugos concentrados).

Otros sectores: Coca Cola de Argentina (bebidas gaseosas), Air Liquide de Argentina (gases industriales) Tecmes (instrumentos de medición), Stefani, Zanon (cerámicas). AGA S.A. del grupo Linde (gases especiales) y Loma Negra (cemento). (Secretaría de Industria y Comercio y PYME. Provincia del Neuquén, 2004).

En esta tesis, el área definida para la aplicación de la metodología de selección fue la planta de tratamiento de residuos peligrosos emplazada en el parque



industrial de la ciudad de Senillosa, localizada en la zona centro-oeste de la provincia del Neuquén. Se seleccionó la ciudad de Senillosa principalmente por su ubicación estratégica con respecto a los lugares de generación de residuos de la actividad hidrocarburífera, por la facilidad con respecto al uso de rutas y caminos ya establecidos, las condiciones físicas y ambientales del sector, y la compatibilidad del uso del suelo.

Generalidades de la ciudad de Senillosa.

La ciudad de Senillosa se encuentra ubicada en la zona este de la provincia y emplazada sobre la ruta Nacional N°22, dista a 18 km de la ciudad de Plottier y a 33 km de la Ciudad de Neuquén Capital. Cuenta con una extensión de 142.000 ha. Se ubica en la zona centro-este de la provincia del Neuquén sobre la Ruta Nacional N° 22. Al este de Arroyito (17 Km), al oeste de Plottier (18 km) y 33 km al oeste de Neuquén Capital (Municipalidad de Senillosa, 2001).

Senillosa se encuentra enmarcada dentro del ámbito de la cuenca Neuquina que comprende casi la totalidad de la provincia del Neuquén, la porción suroccidental de la provincia de Mendoza y el sector occidental de las provincias de la Pampa y Río Negro.

Los suelos se caracterizan por el déficit hídrico anual. El clima de la región por su parte, es árido. La temperatura media en verano oscila entre 21°C- 25° C y en invierno entre 4°C - 2° C. Las precipitaciones anuales son menores a los 250 mm, ubicándose dentro de un clima semiárido o árido de estepa (Alessi, A., 2007).

Con respecto a la hidrología e hidrogeología, la región pertenece a la cuenca del río Limay, hacia la cual drenan las aguas superficiales. En la región circundan los canales de riego, que funcionan durante gran parte del año para proveer agua a los cultivos.

Con relación a la flora, la exhibe una predominancia marcada de estepas xerófitas, psamófila o halófila (mayoritariamente arbustivas y arbustivas-graminosas). En el área donde se ubica la planta existe un porcentaje de cobertura vegetal del 40-60%.

El paisaje constituye un contraste entre la aridez que caracteriza a la estepa patagónica y el oasis creado a partir del paso del río Limay y del sistema de riego por canales.

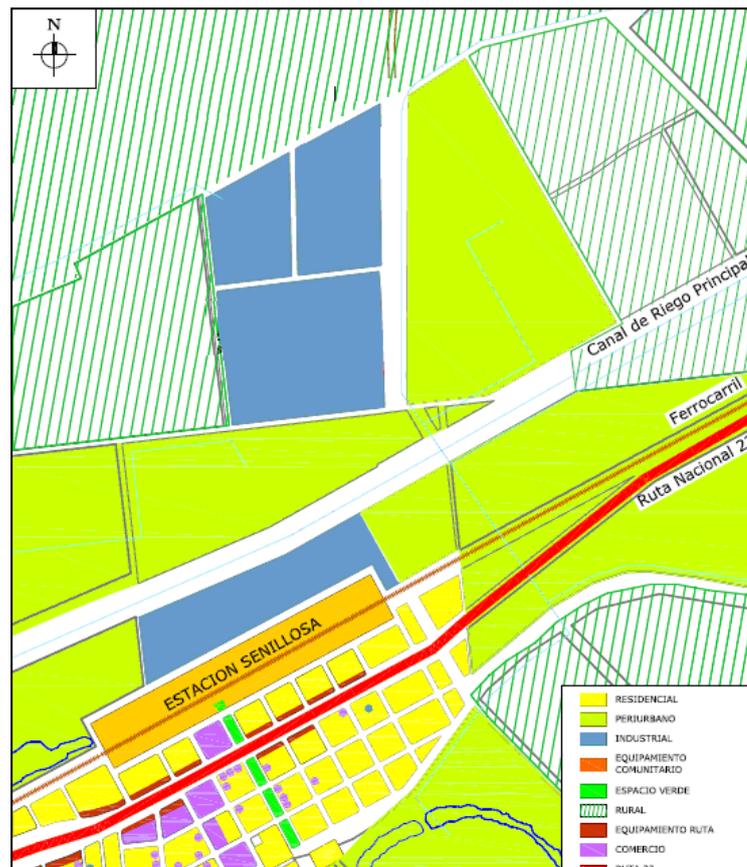
Componente socio-económico

Cuenta con 7.542 habitantes (INDEC, 2010), lo que representa un incremento del 30,7% frente a los 5.770 habitantes del censo anterior.

El área urbana cuenta con servicio de energía y agua potable de cobertura domiciliaria en la totalidad de su planta actual. La provisión de agua para actividades agrícolas productivas es a través del sistema de canales de riego provenientes de la red de riego de la localidad. Cuenta con red de gas natural en la totalidad del sector urbanizado y se extiende la red hacia el parque industrial y sector del emprendimiento del complejo penitenciario U.9. El sector periurbano y áreas rurales no obtienen el servicio de gas.

Los usos del suelo en la localidad de Senillosa se representan en la Figura 8 donde el periurbano y el residencial son el uso predominante actual.

Figura 8. Usos del suelo, localidad Senillosa.

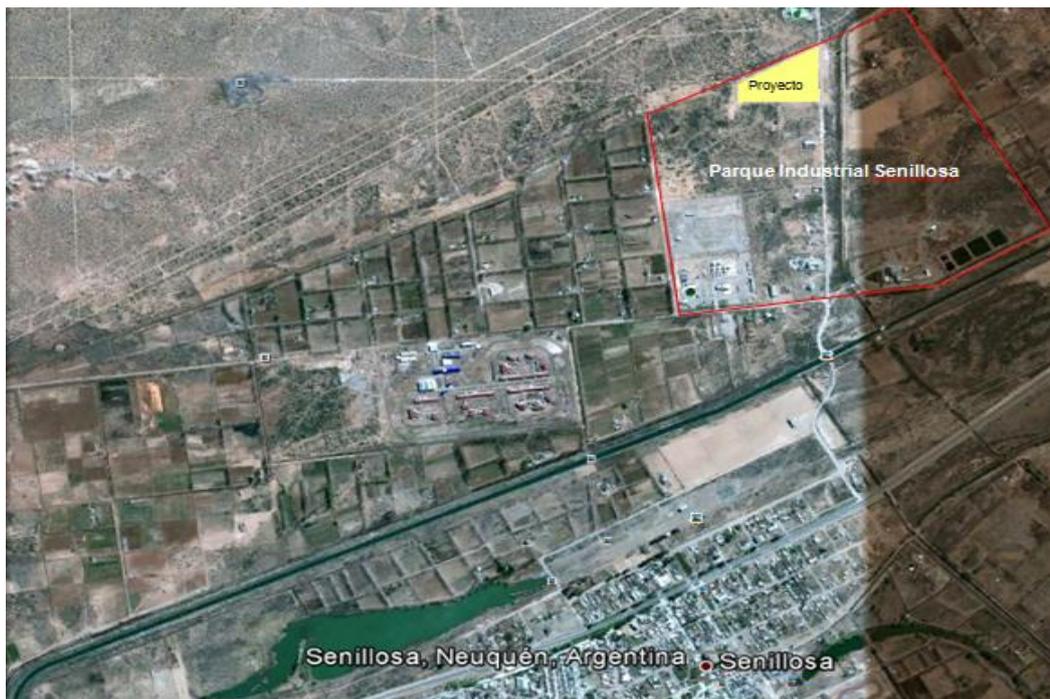


Fuente: (Municipalidad de Senillosa, 2001)

Descripción del predio ubicado en el parque industrial Senillosa.

La planta de tratamiento de residuos peligrosos está ubicada en el Lote B Fracción IV del parque industrial de la ciudad de Senillosa, Figura 9.

Figura 9. Ubicación del Proyecto.



El predio cuenta con un área de 3 ha, dista a 1,5 km aproximadamente de la zona urbana de la ciudad de Senillosa. Limita al Sur con una curtiembre ubicada a 400 m aproximadamente, al Este con un centro de sacrificio animal, al Oeste con zona de chacra y al Norte con un predio de 1000 ha de la empresa Capex.

Actualmente, en el área se encuentra ubicada una planta de tratamiento de residuos peligrosos con tecnología de incineración y tratamiento de gases en seco a través de filtros catalíticos. Ésta área no cuenta con red cloacal y el suministro de agua para servicios debe ser a través de pozos de captación.

4.2. Industria Hidrocarburífera en la Provincia del Neuquén

Desde el descubrimiento del petróleo neuquino, ocurrido el 29 de octubre de 1918 en la localidad de Plaza Huincul, la provincia ha logrado un crecimiento sostenido en la actividad hidrocarburífera que se afianzó con el hallazgo y desarrollo de numerosos yacimientos. El yacimiento gasífero de Loma de la Lata descubierto en el año 1977, hizo posible que desde el año 1982 la provincia ocupe el primer lugar en la producción de gas natural.

La cuenca neuquina, además de la provincia del Neuquén, incluye parte de las provincias de Río Negro, la Pampa y Mendoza, es la zona petrolera y gasífera más importante de la Argentina. Entre número de pozos perforados y superficie total, puede decirse que se halla moderadamente explorada. Para el 2013 se calcula que concentra un 21.2% de las reservas de petróleo y un 42.3% de las existencias de gas natural del país (Tabla 12). La participación de la provincia del Neuquén es del 37% para gas natural y del 11.2% para petróleo.

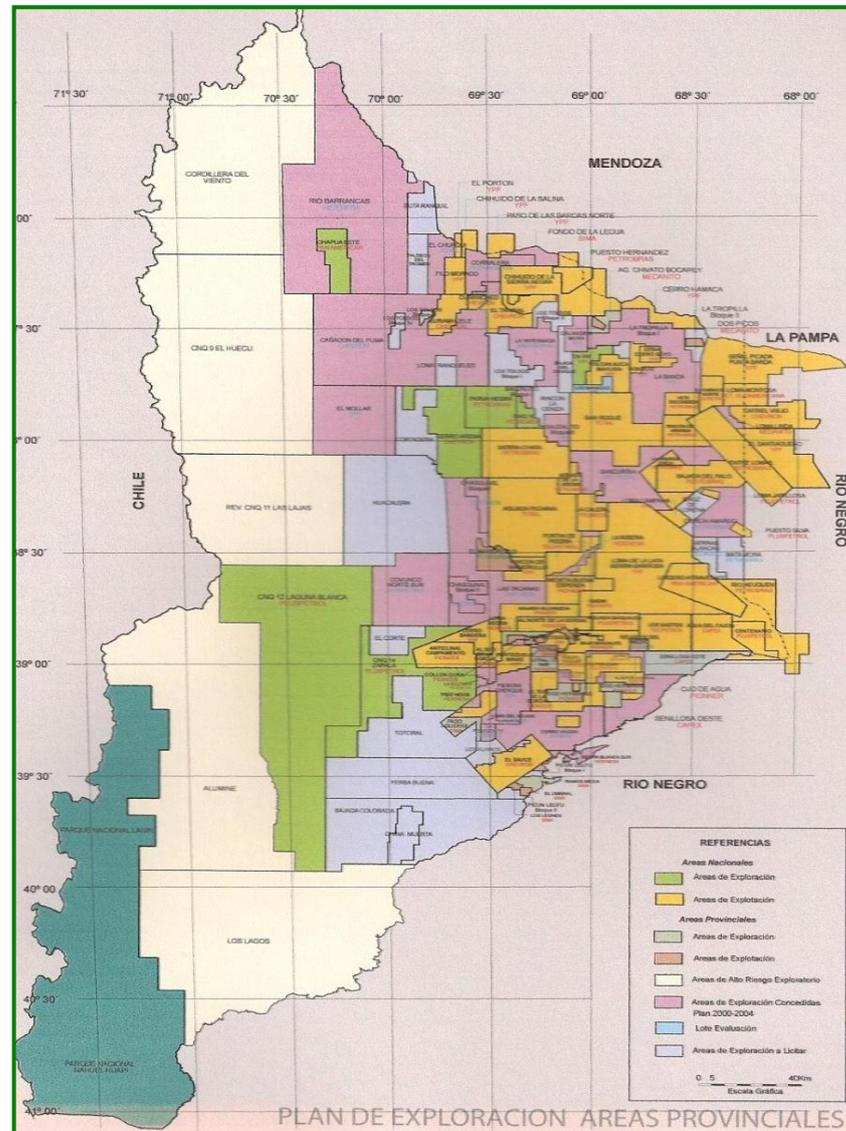
Tabla 12. Cuenca neuquina, producción y reserva de petróleo¹⁷.

Cuenca	Participación	
	Gas Natural	Petróleo
Neuquina	42.3%	21.2%
Golfo San Jorge	14.6%	67.8%
Austral	33.7%	3.7%
Noroeste	9.2%	1%
Cuyana	--	6.1%

En el 2010 la secretaría de estado de recursos naturales y servicios públicos de la provincia del Neuquén informó la existencia de 71 áreas de exploración y de 69 áreas de explotación en la cuenca Neuquina (Figura 10). Dentro de las principales empresas responsables de la producción en el año 2009 se encuentran: YPF S.A, Petrobras Energía S.A, Pluspetrol, Apache Energía Argentina S.R.L. y Chevron Argentina S.R.L. Además de las operadoras, es importante considerar un número importante de compañías que brindan servicios a este sector, se pueden señalar Baker Hughes Argentina, Alpeco, Production Operators Argentina, Weatherford, Key, BJ, Schlumberger, entre otras.

¹⁷ Tomado el 2016/02/21 de web.iae.org.ar/wp-content/uploads/2015/01/Informe_reservas_2013_IAE_Mosconi.pdf

Figura 10. Áreas hidrocarburíferas de la cuenca Neuquina.



Fuente: (Secretaría de Estado de Energía y Minería, 2006)

4.2.1. Generación de Residuos Peligrosos en la Actividad Hidrocarburífera. Provincia del Neuquén.

La generación de residuos, en todos sus tipos, es una consecuencia inevitable de la actividad extractiva. De acuerdo a información de Repsol, los residuos en la actividad hidrocarburífera se generan principalmente en las actividades de explotación, producción y refinado. Entre los más importantes se encuentran los lodos de perforación, fondos de tanques y suelos. En la Cuadro 5 se hace un detalle de los residuos de acuerdo a la corriente de clasificación, correspondiente a una operadora tipo.



Cuadro 5. Características de los residuos sólidos en la fase de exploración.

RESIDUO	DESCRIPCIÓN
Lodos aceitosos	Lodos del mantenimiento de tanques, vasijas, sistemas de tratamiento de aguas residuales, etc.
Otros lodos	Residuos sólidos de plantas de tratamientos de aguas residuales domésticas, pozos sépticos, etc.
Suelos contaminados	Tierra contaminada por derrames de hidrocarburos o de productos químicos utilizados en la operación.
Chatarra	Partes y piezas de equipo: tuberías; láminas, etc. contaminadas con aceite, grasa mecánica o productos químicos,
Canecas	Tambores metálicos contaminados con productos químicos o con lubricantes.
Baterías	Contienen ácido diluido y se fabrican con láminas de plomo.
Baterías secas	Equipos de comunicación y aparatos electrónicos.
Filtros	De aire, combustible o aceite, utilizados por los vehículos y algunos equipos industriales.
Partes eléctricas	Herrajes, cable, tableros, controles, balastos etc.
Cortes de perforación	Roca extraída del subsuelo durante la perforación; contaminados con el lodo de perforación, aceite etc.
Partes eléctricas especiales	Arrancadores, transformadores, interruptores de potencia y otros elementos con aceite dieléctrico.
Materiales	Correas, empaques, estopa, filtros etc. contaminados con hidrocarburos.
Grasa	Residuos de grasa que se producen durante el mantenimiento de equipos y maquinaria al servicio del proyecto.
Escombros de construcción	Materiales de demolición o materiales de construcción no utilizables.
Residuos de laboratorio	Envases de productos químicos, papel contaminado con HCs, vidriería, etc.
Basuras domésticas	Residuos asociados a la actividad de tipo doméstico (viviendas, casinos, cafeterías), y al funcionamiento de oficinas.

Fuente: (Gómez & González, 2009)

Cuadro 6. Características de los residuos sólidos en la fase de explotación.

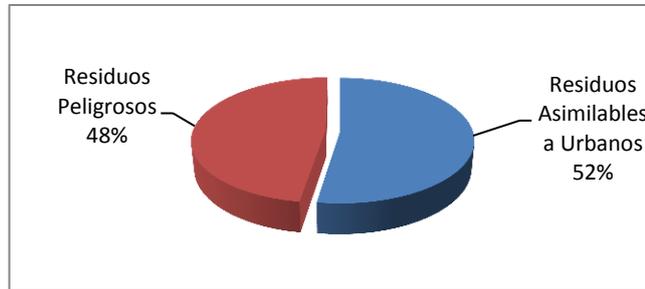
RESIDUO	DESCRIPCIÓN
Residuos de laboratorio	Envases de productos químicos, papel contaminado con HCsetc.
Llantas	Llantas de vehículos y maquinaria.
Contaminados con hidrocarburos	Guantes, overoles, botines, máscaras, cascos, cintas de polietileno estopa, trapos, plásticos, maderas, papel, cartón, gomas, membranas contaminados con hidrocarburos. Tambores de chapa y plásticos, bolsas, latas de pintura, pinceles Espuma, rellenos de poliuretano, revestimiento, aislantes de cables y cañerías
Arenas de sandblasting	Arena con contenido de óxidos metálicos, resultante del mantenimiento de tanques tuberías y vasijas.
Residuos de atención de pacientes	Desechos patógenos, drogas vencidas, placas radiográficas y, muestras de laboratorio.
Residuos domésticas	Residuos asociados a la actividad de tipo doméstico (viviendas, casinos, cafeterías y oficinas).

Fuente: Adecuado de (Gómez & González, 2009) y (Repsol YPF, 2007)

La generación de residuos sólidos contaminados con hidrocarburos como textiles, EPP's, membranas etc. existe durante todo el proceso productivo y la cantidad se incrementa durante la etapa de explotación. En la explotación hay mayor número de pozos y por ende mayor uso de facilidades y conexiones que permiten llevar la producción de boca de pozo hasta los centros de recolección y finalmente hasta los centros de distribución y consumo a través de los oleoductos. En esas facilidades de producción existen una serie de válvulas e implementos de medición en las que se utilizan trapos, embalajes etc. y todos los elementos de seguridad del personal (guantes, cascos, mamelucos, etc.) que por contacto con el hidrocarburo se clasifican como residuo peligroso.

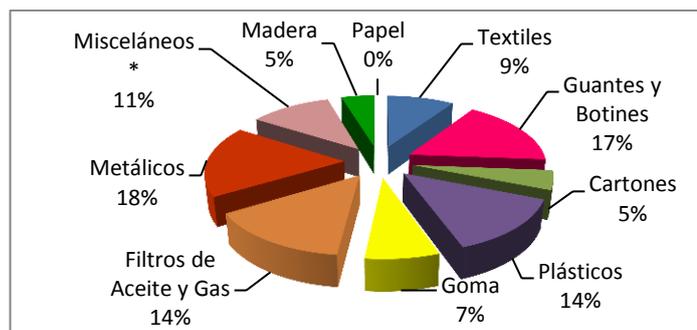
De acuerdo a la caracterización realizada en la campaña de diciembre de 2006 en la UELLL (Espinoza, Amal, Rodríguez, Vercesi, & Torres, 2006), la cantidad generada de residuos, denominado en el cuadro anterior como "contaminado con hidrocarburo", para esta unidad, es de 688 kg/día que corresponde al 48% del total de residuos generados como se muestra en la Figura 11. Estos residuos peligrosos a su vez se caracterizan en diferentes tipos (Figura 12), donde el 68% (468 kg/día) son residuos con un alto poder calorífico, atractivos para los procesos de tratamiento térmico.

Figura 11. Caracterización de residuos sólidos para el Yacimiento Unidad Económica Loma La Lata (UELLL).



Fuente. (Espinoza, Amal, Rodríguez, Vercesi, & Torres, 2006)

Figura 12. Caracterización de residuos sólidos peligrosos del el Yacimiento de la Unidad Económica Loma La Lata (UELLL).



Fuente: (Espinoza, Amal, Rodríguez, Vercesi, & Torres, 2006)

* Mezcla de elementos orgánicos e inorgánicos, no identificables de tamaño menor a 1/2 pulgada.

Debido a que en la provincia del Neuquén no existen registros de la cantidad de residuos peligrosos por parte de la autoridad provincial, se tomaron valores estimativos para la cuenca neuquina, calculados a partir de los residuos generados en la UELLL para la fase de explotación.

Es importante mencionar que el valor es un estimado ya que se deben tener en cuenta variables como la cantidad de personal, la cantidad de pozos, la complejidad de las instalaciones etc. que influyen directamente en la cantidad de residuos generados para cada yacimiento.

Para el cálculo se tomaron las áreas de explotación en la cuenca Neuquina y la cantidad de residuos generados por día en la UELLL. Teniendo en cuenta que son 69 las áreas de explotación (Secretaría de Estado de Energía y Minería,



2006), se estima que la cantidad de residuos sólidos peligrosos generados diariamente en la cuenca Neuquina son 47 ton de los cuales 32 ton pueden ser tratadas a través de metodologías de térmicas.

4.2.2. Tratamiento de los Residuos Sólidos Peligrosos Generados en la Actividad Hidrocarburífera de la Provincia del Neuquén.

En la provincia del Neuquén los residuos generados por la actividad hidrocarburífera son legislados bajo el mismo marco normativo de los residuos peligrosos. La ley provincial N° 1875 en su anexo VIII, establece los requisitos para cada una de las etapas de: generación, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos. Debido a que lo que ocupa a esta investigación es la etapa del tratamiento, a continuación se hace una descripción de los métodos térmicos desarrollados actualmente en la provincia del Neuquén.

4.2.2.1. Co-procesado de los Residuos Peligrosos.

En la provincia del Neuquén existe la planta de Loma Negra para fabricación de clínquer ubicada a 186 km de la capital de la provincia y a 120 km de la ciudad de Senillosa. Actualmente la planta hace recepción de residuos líquidos con alto poder calorífico porque no está preparada técnicamente para el tratamiento de residuos sólidos.

En las Heras, provincia de Mendoza a 880 km de la ciudad de Senillosa se encuentra ubicada la planta Holcim para el co-procesado de residuos. Es la planta de fabricación de clínquer más cercana que recibe residuos sólidos peligrosos para el co-procesado. En esta planta se tratan todos los residuos incinerables generados en la provincia de Mendoza. La legislación de la provincia de Mendoza, permite el ingreso de residuos peligrosos a la provincia bajo cumplimiento del Artículo 4 del decreto provincial N° 2625/99: "Prohíbese el ingreso al territorio provincial de residuos peligrosos provenientes de otras provincias, salvo que lo hagan en carácter de transporte de paso, o estén destinados a su tratamiento y disposición final en plantas ubicadas en territorio provincial y habilitadas a tal efecto".

Debido a que el co-procesado de residuos es una tecnología que depende de otra unidad de negocio (fabricación de clínquer) se hace un análisis de su viabilidad de forma individual, es decir, no se incluye en la aplicación de la metodología de selección de alternativas. Para el análisis se tendrá en cuenta

el transporte de los residuos tomando los precios del mercado a partir de empresas tipo (Tabla 13).

Tabla 13. Costos del tratamiento de residuos por co-procesado, Mendoza.

Ítem	\$ Unitario	\$ Total
Costo de disposición de residuos (2010)	1100/ton	27.500
Costo de transporte a la planta de co-procesado (2010)	10/km	17.000/viaje
Total		44.500

El costo total de la disposición de residuos se hace con base en la capacidad máxima de transporte. En promedio, el camión puede alcanzar una capacidad máxima de 25 toneladas por viaje, quiere decir que el costo de tratamiento por viaje es de \$ 27.500. Por su parte, el costo de transporte está calculado por kilómetro, en cada viaje (ida y vuelta) son 1700 km, es decir \$ 17.000 por viaje.

Para conocer la viabilidad, se compara con el costo que saldría si los residuos se trataran en la ciudad de Senillosa (Tabla 14).

Tabla 14. Costos del tratamiento térmico de residuos en la ciudad de Senillosa.

Ítem	\$ Unitario	\$ Total
Costo de disposición de residuos. (2010)	1.800/ton	45.000
Costo de transporte. (2010)	60/km	600/viaje
Total		\$ 45.600

De acuerdo al mercado, el costo de disposición del tratamiento de los residuos peligrosos en la provincia del Neuquén es de \$1.800/ton, quiere decir que para una capacidad de 25 ton (capacidad total del camión), costaría \$ 45.000. Por su parte, el costo del transporte se calcula para 60 km (ida y vuelta) desde Neuquén capital a la ciudad de Senillosa.

Si se relacionan las dos posibilidades de tratamiento, la alternativa del co-procesado en las Heras, Mendoza es menos costosa (la diferencia es de \$0,44/ton) que tratar en la planta de Senillosa. Sin embargo, el tratamiento por co-procesado va incrementando sus costos debido a:



- Se debe tener la seguridad de completar la capacidad del camión.
- Es necesario la instalación de un punto de acopio de residuos, ya que de acuerdo a la información secundaria, cada empresa genera alrededor de 549 kg/día. Una planta de acopio requiere inversión, recurso humano y mantenimiento de las instalaciones.
- Incremento en horas conductor por cortes de ruta, autorización para el ingreso a la planta de co-procesado, algún inconveniente con los residuos entre otros.
- Trámites y habilitaciones exigidos en la legislación de la provincia de Mendoza.

Como conclusión del análisis, el co-procesado no es viable como tratamiento térmico bajo las condiciones de generación y ubicación de residuos. Sería una alternativa interesante si estuviese localizada a una menor distancia de la zona de generación.

4.2.2.2. Plantas de Tratamiento Térmico Ubicadas en la Provincia del Neuquén.

La metodología de tratamiento térmico de los residuos peligrosos está aprobada bajo la ley provincial 1875, Anexo VII D10 “incineración en tierra”. Actualmente, en la provincia del Neuquén existen cuatro (4) plantas habilitadas en relación con este concepto.

En la Tabla 15 se hace una descripción general de las características de los equipos usados por cada una de las plantas emplazadas en la zona. Para esta investigación, se definen como planta 1, 2, 3 y 4.

Tres de los equipos usados para el tratamiento térmico de los residuos son hornos incineradores, quiere decir que requieren exceso de oxígeno para producir una combustión completa. Son equipos estáticos de cámara horizontal. Cuentan con una cámara secundaria o de postcombustión para la oxidación de los gases generados en la primera cámara. Estos tres equipos cuentan con un sistema de monitoreo ON-LINE de los principales gases generados en la combustión.

Tabla 15. Características de los hornos, provincia del Neuquén.

Planta	Descripción del Horno	Capacidad	Tratamiento de Emisiones
1	Horno Incinerador – Estático – Cámaras Primaria y Secundaria Horizontales.	600 kg/hora	Tratamiento en seco: Celdas – Filtros catalíticos
2	Horno Incinerador – Estático - Cámara Primaria y Secundaria Horizontales.	600 kg/hora	Lavado de gases (scrubbers) tipo Venturi.
3	Horno Incinerador. Cámara Primaria y Secundaria	300 kg/hora	Lavado de Gases
4	Horno Artesanal	200 kg/hora	No tiene

Por su parte, la planta 4 tiene un equipo artesanal que consiste en el proceso de combustión básica en una cámara primaria sin tratamiento de emisiones.

La capacidad total para el tratamiento térmico de los residuos peligrosos en la provincia del Neuquén es de 34 ton/día (1,7 ton/hora), valor que corresponde a la suma de las capacidades de cada una de las plantas emplazadas en la provincia. La cantidad de residuos generados en la actividad hidrocarburífera que pueden ser tratados por metodologías térmicas, de acuerdo a la estimación de esta tesis, son 32 ton/día. Suponiendo una operación diaria de 20 horas se precisaría una capacidad de 1,6 ton/hora. De acuerdo a lo anterior, la capacidad de las plantas es suficiente para tratar los residuos generados, sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de empresas habilitadas para el tratamiento de residuos peligrosos es alta, lo cual genera mayor vulnerabilidad con relación a la posible afectación o impacto negativo al medio ambiente.

Con respecto al tratamiento de emisiones, dos de las plantas emplazadas en la provincia para el tratamiento térmico de residuos peligrosos cuentan con el sistema de tratamiento de lavado de gases (scrubbers), cumpliendo de esta manera los estándares exigidos por la normativa. Por su parte, la planta 1 trata los gases y el material particulado a través de un sistema en seco conocido como filtros cerámicos catalíticos. Es un sistema novedoso único en el país con un elevado costo de inversión.



4.3. Preparación y Organización para Aplicar el AHP Dentro del Contexto del Tratamiento Térmico de los Residuos Generados en la Actividad Hidrocarburífera de la Provincia del Neuquén.

La aplicación del AHP brinda la ayuda necesaria para la selección de la alternativa de tratamiento térmico con base en el análisis de los criterios y subcriterios que serán determinados en el presente capítulo.

Para la aplicación del modelo se deben convocar talleres de trabajo donde, para la emisión de juicios, participen los actores seleccionados, relacionados con la temática a analizar. En esta tesis, la emisión de juicios se llevará a cabo a través de la revisión de la literatura.

4.3.1. Información Requerida

- Descripción técnica de los tratamientos térmicos
- Impactos ambientales y sociales de los tratamientos térmicos
- Inversión, operación e ingresos de los tratamiento térmicos
- Cantidad de residuos a tratar
- Madurez de las tecnologías en el país
- Aspectos normativos nacionales y provinciales (Anexo I)

4.3.2. Recursos asociados al proceso

El desarrollo de la metodología AHP se realizó a través del programa Microsoft Excel ®.

4.3.3. Estructuración del Modelo Jerárquico

A continuación se describe la estructura del modelo jerárquico para la aplicación del AHP.

4.3.4. Identificación del Problema

El importante crecimiento de la actividad hidrocarburífera en la provincia del Neuquén trae consigo el incremento en la generación de residuos peligrosos cuya principal característica es el alto poder calorífico.



Actualmente en la provincia se encuentran habilitadas cuatro (4) plantas para el tratamiento térmico de residuos peligrosos lo cual genera mayor vulnerabilidad con relación a la posible afectación o impacto negativo al medio ambiente que si hubiese una sola instalación para el tratamiento de los residuos en estudio donde se analicen los aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales.

4.3.5. Definición del Objetivo

Seleccionar la alternativa para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera que represente una mejor opción técnica, ambiental, económica y social para la provincia del Neuquén.

4.3.6. Identificación de Criterios y Subcriterios

Para la selección del tratamiento térmico de residuos generados en la industria hidrocarburífera se determinaron los siguientes criterios y subcriterios.

Ambiental (C₁). *En este criterio se analizan los diferentes aspectos que se deben tener en cuenta para no afectar en forma negativa al ambiente. Los subcriterios asociados a este criterio son:*

- *Emisiones.* Este subcriterio incluye las emisiones producidas durante las operaciones para cada tipo de tratamiento. Los tipos de emisiones que se consideran son: NO_x, SO₂, HCl, metales pesados, dioxinas y furanos.
- *Ubicación geográfica.* Se refiere al sitio donde se ubican las instalaciones para el tratamiento de residuos y a los efectos negativos generados en la operación sobre los ecosistemas cercanos.
- *Generación de cenizas.* Consiste en el volumen y contaminantes de las cenizas producidas por el tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera.
- *Aprovechamiento energético.* Se refiere a la valorización energética generada a través de los gases producidos en el tratamiento térmico de los residuos.



Económico C2. En este criterio se incluyen los aspectos que expresan flujo de dinero representados en costos e ingresos generados por cada alternativa de tratamiento (Guevara, *et al.*, 2012)

- *Costo inicial.* Consiste en la inversión que se debe hacer para llevar a cabo una alternativa. Se considera la suma del costo del terreno, la construcción de la instalación necesaria para la operación, y los costos de adquisición y montaje de los equipos requeridos para el tratamiento.
- *Costo de operación.* Se refiere a los costos fijos y variables incurridos para el funcionamiento del sistema. Este incluye los costos relacionados a la eliminación de los residuos originados por el proceso de tratamiento.
- *Ingresos.* Se refiere a los beneficios económicos adquiridos por la venta de los productos obtenidos a partir del tratamiento de residuos peligrosos, principalmente la venta de material vítreo y energía.

Social C3. Criterio relacionado con el impacto social por la ejecución de los tratamientos térmico de los residuos peligrosos.

- *Aceptación social:* Se considera en este subcriterio que la alternativa de tratamiento sea viable socialmente teniendo en cuenta las preocupaciones y los conceptos de las personas de todos los sectores de la comunidad.

Técnico C4. Este criterio relaciona específicamente los aspectos relacionados con la capacidad de tratamiento y la tecnología.

- *Confiabilidad técnica.* Está relacionado con la capacidad de los sistemas de tratamiento de residuos para realizar sus funciones requeridas en las condiciones establecidas.
- *Madurez de la tecnología.* El tratamiento viable es aquel que tiene la tecnología disponible y tiene alto grado de madurez tecnológico.

4.3.7. Identificación de Alternativas

Dado que el objetivo se centra en la elección de un sistema de tratamiento térmico para los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera,

a continuación se enumeran las alternativas aplicables al tratamiento térmico de los residuos de estudio.

Alternativa 1: Incineración.

Alternativa 2: Pirólisis

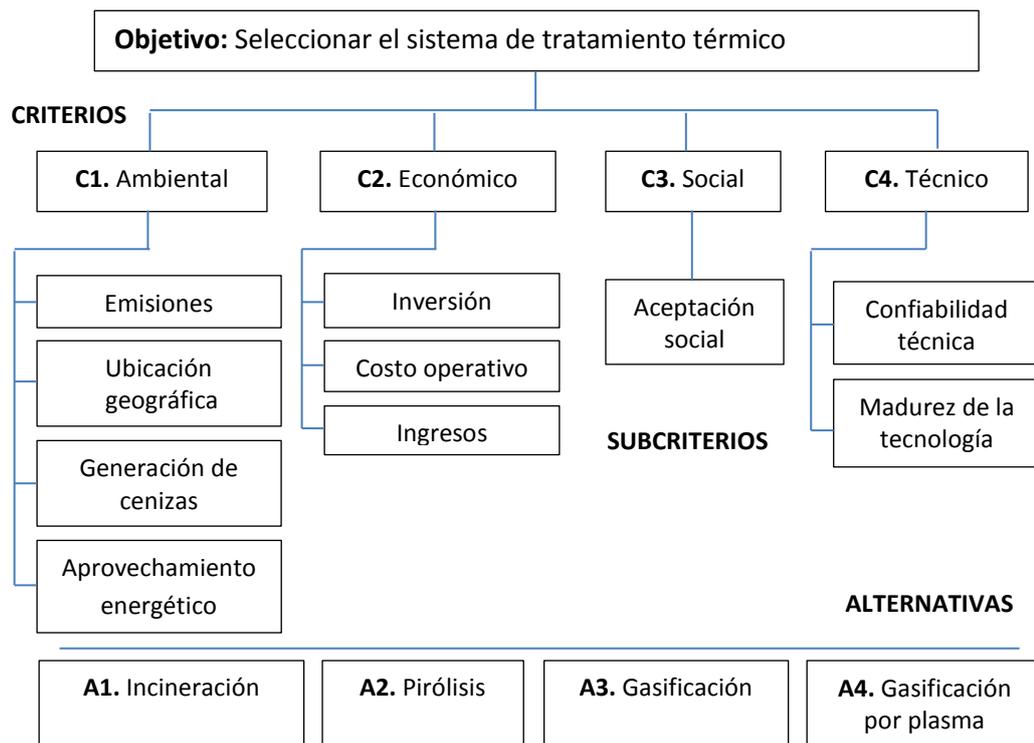
Alternativa 3: Gasificación

Alternativa 4: Gasificación por plasma

4.3.8. Árbol de Jerarquías

Una vez determinado el objetivo, los criterios, los subcriterios y las alternativas, se procede a graficarlos en la estructura del árbol de jerarquías (Figura 13).

Figura 13. Árbol de jerarquías para la selección del sistema de tratamiento térmico.



4.4. Evaluación del Modelo

4.4.1. Emisión de Juicios y Evaluaciones

Con base en la revisión bibliográfica se realizaron las comparaciones pareadas de los criterios, los subcriterios y las alternativas que posteriormente fueron cuantificadas utilizando los valores establecidos en la escala de Thomas Saaty. Estos juicios fueron plasmados en las matrices de comparaciones pareadas correspondientes.

4.4.2. Prioridad Respecto a la Meta Global

Son cuatro los criterios que asisten directamente al cumplimiento de la meta global: el criterio ambiental, el criterio económico, el criterio social y el criterio técnico.

En la presente investigación, las prioridades de los criterios fueron tomadas directamente del estudio: "Selección de sistemas de tratamiento de residuos sólidos residenciales a través de técnicas multicriterio" elaborado por Urbano D., (2012), donde el grupo de trabajo, en la comparación por pares, asignaron valores numéricos generando el siguiente vector propio de la matriz:

Tabla 16. Vector propio de la matriz de criterios para la evaluación de los sistemas de tratamiento térmico.

Criterios	Vector propio de la matriz de criterios
C1. Ambiental	0.328
C2. Económico	0.211
C3. Social	0.234
C4. Técnico	0.227

De los valores de la Tabla 16 se interpreta que el criterio con mayor peso es el ambiental con una importancia de un 32.8%. El criterio económico por su parte tiene un 21.1%, la menor importancia comparada con los demás criterios.



4.4.3. Prioridad Respecto a los Criterios

A continuación se detallan las evaluaciones realizadas a los sub-criterios que integran cada uno de los cuatro criterios: el ambiental, el económico, el social y el técnico.

4.4.3.1. Criterio ambiental

Para este criterio se identificaron cuatro subcriterios que asisten directamente a su cumplimiento, estos son: emisiones, ubicación geográfica, generación de cenizas y aprovechamiento energético. Las comparaciones pareadas entre los subcriterios se analizan a continuación:

- **Emisiones vs. ubicación geográfica.** El subcriterio de ubicación geográfica es ligeramente más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que el subcriterio de emisiones debido a que el emplazamiento de una planta de tratamiento térmico de residuos peligrosos debe, previo a su instalación, cumplir con el uso suelo (industrial) establecido en el ordenamiento territorial del municipio. Sin embargo por tratarse de un tratamiento térmico las emisiones no restan importancia.
- **Emisiones vs. generación de cenizas.** El subcriterio de emisiones es ligeramente más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que el subcriterio de generación de cenizas debido a la complejidad de los tratamientos térmicos y a la legislación relacionada con los parámetros de emisión (Anexo III). Sin embargo, es necesario resaltar que la generación de cenizas también afecta la calidad del aire.
- **Emisiones vs. aprovechamiento energético.** El subcriterio de emisiones es más importante para evaluar en los diferentes tratamientos térmicos que el subcriterio de aprovechamiento energético debido a que este último subcriterio no tiene reglamentación en el país a diferencia de los parámetros de emisión. Sin embargo el aprovechamiento energético es interesante a la hora de evaluar los costos operativos e ingresos en el tratamiento de residuos.
- **Ubicación geográfica vs. generación de cenizas.** El subcriterio de ubicación geográfica es más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que el subcriterio de generación de cenizas debido a que el emplazamiento de una planta de tratamiento térmico de



residuos peligrosos debe cumplir, previo a su instalación, con el uso del suelo (uso industrial) establecido en el ordenamiento territorial del municipio. Por su parte, la generación de cenizas depende del tipo de tecnología seleccionado (incineración, pirolisis, gasificación o gasificación por plasma) y del manejo y gestión en la operación de tratamiento.

- **Ubicación geográfica vs. aprovechamiento energético.** El subcriterio de ubicación geográfica es marcadamente más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que el aprovechamiento energético debido a que para emplazar una planta de tratamiento térmico se debe cumplir inicialmente con la compatibilidad del uso del suelo (uso industrial). Por otro lado, el aprovechamiento energético no es actualmente un requisito legal en la legislación nacional.

- **Generación de cenizas vs. aprovechamiento energético.** El subcriterio de generación de cenizas es ligeramente más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que el aprovechamiento energético debido a que el mal manejo de las cenizas puede causar impactos negativos en el ambiente. El aprovechamiento energético por su parte no es actualmente un requisito legal, sin embargo, no resta importancia por el importante aporte en la disminución del uso de recursos.

Respecto al criterio ambiental, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 17. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios ambientales.

C1. Criterio Ambiental	Emisiones	Ubicación geográfica	Generación de cenizas	Aprovechamiento energético
Emisiones	1,0	0,5	2,0	5,0
Ubicación geográfica	2,0	1,0	4,0	7,0
Generación de cenizas	0,5	0,3	1,0	3,0
Aprovechamiento energético	0,2	0,1	0,3	1,0

4.4.3.2. Criterio Económico

Para este criterio se identificaron tres subcriterios que asisten directamente a su cumplimiento, estos son: inversión, costo operativo e ingresos.

A continuación se detallan las comparaciones pareadas entre los subcriterios:

- **Inversión vs. costo operativo.** Si se reducen los costos operativos (gastos, costos fijos, directos, indirectos y variables) existe la posibilidad de minimizar el tiempo de retorno de la inversión. Es por ello que el subcriterio de costo operativo se considera marcadamente más importante para evaluar los diferentes tratamientos térmicos que la inversión, estos son los que mantienen el sistema que se proyecta.
- **Inversión vs. ingresos.** Los ingresos incrementan si el costo operativo disminuye. Al incrementar los ingresos, existe la posibilidad de minimizar el tiempo de retorno de la inversión. Es importante tener en cuenta que el ingreso (servicio, venta de materiales y energía) es determinado en gran proporción por el mercado, es por ello que el subcriterio de ingresos se considera ligeramente más importante que la inversión.
- **Costo operativo vs. ingresos.** El subcriterio de costo operativo se considera ligeramente más importante que el subcriterio de ingresos, esto es debido a que la eficiencia de los procesos puede manejarse a través de las decisiones de la empresa, lo anterior conllevaría a la reducción en los costos operativos. Los ingresos por su parte dependen del precio del mercado en la prestación del servicio de tratamiento, así como de la economía de escala, es decir, el funcionamiento de la planta en su capacidad completa.

Respecto al criterio económico, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 18. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios económicos.

C2. Criterio Económico	Inversión	Costo operativo	Ingresos
Inversión	1,0	1/7	1/2
Costo operativo	7,0	1,0	3,0
Ingresos	2,0	1/3	1,0



4.4.3.3. Criterio Social

Para este criterio se identificó un (1) subcriterio que asiste directamente a su cumplimiento: aceptación social. Por ello no se realiza la comparación por pares, en este caso, se le asignará el peso de los criterios tomado de la revisión bibliográfica. Para el criterio social corresponde el 23.4 %.

4.4.3.4. Criterio Técnico

Para este criterio se identificaron dos subcriterios que asisten directamente a su cumplimiento, estos son: confiabilidad técnica y madurez de la tecnología.

A continuación se detallan las comparaciones pareadas entre los subcriterios:

- **Confiabilidad técnica vs. madurez de la tecnología.** La madurez de la tecnología está relacionada con dos aspectos: 1. La capacidad de inversión, es decir, cuando la tecnología no está desarrollada a nivel nacional y se tiene la capacidad económica para su adquisición y 2. Cuando la tecnología, incluso a nivel internacional, está iniciando su aplicación en el tratamiento de los residuos.

La capacidad técnica se refiere a la aplicabilidad según el tipo de residuos, la capacidad de tratamiento y la reducción del volumen de los residuos. Para este caso, el tratamiento térmico será aplicado para los residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera, la capacidad de tratamiento debe ser de 32 ton/día y el volumen esperado de reducción está en el rango de 75-90% relación v/v.

De acuerdo a lo anterior, se considera que el subcriterio de confiabilidad técnica es marcadamente más importante para evaluar las diferentes alternativas de tratamiento térmico que el subcriterio de madurez de la tecnología, puesto que es indispensable tener en cuenta la aplicabilidad según la caracterización de los residuos. La tecnología puede tener un amplio desarrollo en el tratamiento de los residuos y no tener la aplicabilidad para el tipo de residuos a tratar, lo cual no sería viable a nivel técnico.

Respecto al criterio técnico, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 19. Matriz de comparación por pares que muestra la importancia de los subcriterios técnicos.

C4. Criterio Técnico	Confiabilidad técnica	Madurez de la tecnología
Confiabilidad técnica	1,0	7,0
Madurez de la tecnología	0,1	1,0

4.5. Evaluación de las Alternativas

Para el presente caso de estudio se han determinado las alternativas de: **A1.** Incineración, **A2.** Pirólisis, **A3.** Gasificación, **A4.** Gasificación por plasma.

A continuación se muestra detalladamente las comparaciones pareadas de las alternativas para cada subcriterio de los criterios identificados.

4.5.1. Criterio Ambiental

Emisiones

Los parámetros de emisión de gases y material particulado no se encuentran reglamentados en la normativa de la provincia del Neuquén, por ello, las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos ubicadas en la provincia toman como referencia el anexo II, tabla 11 del decreto Nacional 831/93, reglamentario de la ley 24051 de 1991 o el Anexo IV, tabla D del decreto 3395/96 de la provincia de Buenos Aires, reglamentario de la ley 5965/58. (Anexo III).

En el tratamiento térmico de residuos peligrosos la alteración de los parámetros de emisión establecidos en la normativa de referencia, depende fundamentalmente de la eficiencia del sistema de tratamiento de emisiones instalado. Otras variables a considerar son la caracterización del residuo y el tipo de metodología térmica desarrollada.

A continuación se realiza la comparación de las cuatro alternativas respecto al tipo de metodología térmica desarrollada:

- **Incineración vs. pirólisis.** Comparado con la pirólisis, la incineración genera mayor volumen de gases de combustión, incrementa la velocidad



de los gases y por ende se presenta mayor arrastre de material particulado. Por otro lado, los gases de incineración contienen contaminantes como: NO_x , SO_2 , HCl , metales pesados y mayor probabilidad de presencia de dioxinas y furanos.

La pirólisis por su parte generan un menor volumen de gases de combustión, sin embargo, los gases contienen mayor proporción de hidrocarburos y presencia de contaminantes como: H_2S , HCl , NH_3 , HCN , alquitrán y material particulado. El proceso no provoca importante emisión de dioxinas y furanos debido a que se genera en ausencia de oxígeno.

El 53% de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera, según la caracterización de la UELL (2006), son plásticos y cartón. La combustión de los plásticos que contienen cloro, como el PVC, forman las dioxinas y furanos, así como la combustión incompleta de la lignina presente en los derivados de la madera, como el papel y el cartón. Esta situación hace mucho más vulnerable la formación de dioxinas y furanos. Por ello que la alternativa de la pirólisis se considera ligeramente preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera que la alternativa de la incineración.

- **Incineración vs. gasificación.** Comparada con la incineración, la gasificación genera menor volumen de gases de combustión y material particulado. Los gases contienen contaminantes como: H_2S , HCl , NH_3 , HCN , CO , álcali y material particulado. En la gasificación, debido a la atmósfera reducida, las emisiones de dioxinas y furanos son fuertemente limitadas. De acuerdo a lo anterior, la alternativa de la pirólisis se considera marcadamente preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera que la alternativa de la incineración.
- **Incineración vs. gasificación por plasma.** En la gasificación por plasma se genera menor volumen de gases y material particulado que el tratamiento por incineración. Las características de los gases generados en la gasificación por plasma difieren debido a que: no se generan dioxinas y furanos por la disociación completa de los residuos, la materia orgánica se transforma en gas combustible compuesto de CO y H_2 , los niveles de NO_x y SO_x son mucho más bajos, la presencia de ceniza volante disminuye. Las características mencionadas anteriormente hacen que la alternativa de la gasificación por plasma se considere extremadamente preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera que la alternativa de la incineración.



- **Pirólisis vs. gasificación.** La alternativa de la gasificación se considera preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera a la alternativa de la pirólisis, puesto que los gases de pirólisis tienen una proporción de hidrocarburos (alquitranes en gran proporción) muy superior a los que proceden de la gasificación, y estos a su vez, puede limitar la selección del sistema de tratamiento de emisiones.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** La alternativa de la gasificación por plasma se considera marcadamente preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera a la alternativa de la pirólisis, puesto que los gases de pirólisis tienen una proporción de hidrocarburos (alquitranes en gran proporción) muy superior a los que proceden de la gasificación por plasma, y estos a su vez, puede limitar la selección del sistema de tratamiento de emisiones. Otros aspectos importantes en la gasificación por arco plasma son que: la materia orgánica se transforma en gas combustible compuesto de CO y H₂, los niveles de NO_x y SO_x son mucho más bajos y la presencia de ceniza volante disminuye.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** El proceso de gasificación produce un gas combustible similar al producido por el proceso por plasma, sin embargo es mucho más contaminado y contiene carbonilla, pues las temperaturas más bajas no pueden descomponer todos los materiales. Conforme a lo anterior, la alternativa de la gasificación por plasma se considera ligeramente preferible para el tratamiento térmico de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera que la alternativa de la gasificación.

Respecto a las emisiones, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 20. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de emisiones.

EMISIONES	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	1/2	1/7	1/9
A2. Pirólisis	2	1	1/5	1/7
A3. Gasificación	7	5	1	1/2
A4. Gasificación por plasma	9	7	2	1



Ubicación geográfica

Respecto a la ubicación geográfica, para la siguiente evaluación, se parte de los efectos negativos causados por la operación del sistema de tratamiento térmico. A menores efectos negativos generados por las actividades de la alternativa mejor es la alternativa.

Para el caso de estudio la ubicación de la planta está definida en el parque industrial del municipio de Senillosa. El predio limita al sur con una curtiembre ubicada a 400 metros aproximadamente, al Oeste con zona de chacra, al Este con un centro de sacrificio animal (comúnmente llamado matadero) y al norte con un predio de 1000 ha de la empresa Capex.

Las cuatro alternativas se compararon respecto a la ubicación geográfica, tal como se muestra a continuación:

- **Incineración vs. pirólisis.** El área donde se ubicará la planta corresponde a uso de suelo industrial, sin embargo hay presencia de chacras y de un centro de sacrificio animal que pueden verse afectados por las cenizas volantes generadas en el proceso de incineración. De acuerdo a lo anterior, se considera que la pirólisis es ligeramente preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la incineración.
- **Incineración vs. gasificación.** Por el menor volumen y la baja complejidad de los gases y residuos líquidos generados en el proceso de gasificación se minimiza la posibilidad de una problemática relacionada con la ubicación de la planta en el parque industrial de Senillosa. Por ello, se considera que la gasificación es marcadamente preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la incineración.
- **Incineración vs. gasificación por plasma.** La gasificación por plasma es de los tratamientos que menor impacto tienen. Por sus altas temperaturas, se descomponen todos los materiales y se genera menor cantidad de cenizas. Por el menor volumen y la baja complejidad de los gases y residuos líquidos generados en el proceso se minimiza la problemática relacionada con la ubicación de la planta. Por ello, se considera que la gasificación por plasma es marcadamente preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos



peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la incineración.

Pirólisis vs. gasificación. A diferencia de los demás tratamientos térmicos, la pirólisis, genera mayor volumen de residuos líquidos que, por su complejidad pueden causar impactos negativos en el agua subterránea. La gasificación por su parte puede generar este tipo de residuos cuando el tratamiento del sistema de emisiones es a través de metodologías húmedas. Conforme a lo anterior, se considera que la gasificación es preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la pirólisis.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** De acuerdo a las evaluaciones anteriores, se considera que la gasificación por plasma es preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la pirólisis.
- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Comparando estas dos alternativas con respecto a la ubicación geográfica, resulta que la gasificación es igual preferible para emplazar, en el parque industrial Senillosa, una planta de residuos peligrosos generados por la actividad hidrocarburífera que la gasificación por plasma. Esto es debido a que estas dos tecnologías generan un impacto menor comparado con las otras alternativas evaluadas.

Respecto a la ubicación geográfica, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 21. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de ubicación geográfica.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	1/2	1/7	1/7
A2. Pirólisis	2	1	1/5	1/5
A3. Gasificación	7	5	1	1
A4. Gasificación por plasma	7	5	1	1



Generación de cenizas

Una alternativa será mejor respecto a otra en cuanto menor sea el volumen y concentración contaminante de las cenizas.

Las cuatro alternativas se compararon con respecto a la generación de cenizas, tal como se muestra a continuación:

- **Incineración vs. pirólisis.** Aunque las cenizas volantes de los sistemas de tratamiento de gases de la incineración son una fuente importante de dioxinas y furanos, se considera que con respecto a la generación de cenizas, la incineración es ligeramente preferible a la pirólisis, esto es debido a que en esta última tecnología no se eliminan los residuos sino que los transforma en carbón, partículas, metales pesados y cenizas. La pirólisis es la tecnología que genera mayor cantidad de cenizas y escorias, comparada con los sistemas evaluados en el presente estudio.
- **Incineración vs. gasificación.** Por la temperatura que trabaja la gasificación, la ceniza/escoria podría pasar a un producto vitrificado capaz de cumplir con los requerimientos del TCLP (Toxic Characteristic Leaching Procedure) quedando de esta manera, aprobado para el uso como materia prima en la producción, por ejemplo, de cerámica estructural. Por ello, con respecto a la generación de cenizas, se considera a la gasificación es preferible que la incineración.
- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Las cenizas volantes depositadas en los equipos de tratamiento de gases del proceso de incineración son una fuente importante de dioxinas y furanos. A su vez, por la turbulencia generada en el proceso a causa del exceso de aire, incrementa el volumen de cenizas del proceso térmico. La gasificación por plasma, por su parte, no genera cenizas. Los componentes metálicos y minerales de los residuos son convertidos en slag gracias a las altas temperaturas en la base del reactor de gasificación. Este material se emplea para aplicación de construcción. De acuerdo a lo anterior, con respecto al criterio de generación se considera a la gasificación por plasma marcadamente preferible que la incineración.
- **Pirólisis vs. gasificación.** En el tratamiento de pirólisis, no se eliminan los residuos sino que los transforma en carbón, partículas, metales pesados y cenizas. Es la tecnología que genera mayor cantidad de cenizas y escorias, comparada con los sistemas evaluados en el presente estudio. En la gasificación, por la temperatura que trabaja este



proceso, la ceniza/escoria pasa a un producto vitrificado que podría pasar el TCLP (Toxic Characteristic Leaching Procedure) que puede ser usada como materia prima para la producción de cerámica estructural. De acuerdo a lo anterior, se considera a la gasificación marcadamente preferible que la alternativa de pirólisis.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Comparado con la pirólisis, con respecto a la generación de cenizas, la gasificación por plasma es extremadamente preferible que la pirólisis. La pirólisis es la alternativa que genera mayor cantidad de cenizas y escoria y la gasificación por plasma no genera cenizas. Los componentes metálicos y minerales de los residuos son convertidos en slag gracias a las altas temperaturas en la base del reactor de gasificación.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Comparado con la gasificación por plasma, las temperaturas de la gasificación no siempre descomponen todos los materiales. En el proceso podrían quedar restos de cenizas que deben ser dispuestas en una celda de seguridad autorizada, lo cual incrementa los costos y la complejidad de la operación. De acuerdo a lo anterior, se considera que la gasificación por plasma es ligeramente preferible con respecto a la generación de cenizas que la gasificación convencional.

Respecto a la generación de cenizas, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 22. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de generación de cenizas.

GENERACIÓN DE CENIZAS	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	3	1/5	1/7
A2. Pirólisis	1/3	1	1/7	1/9
A3. Gasificación	5	7	1	1/3
A4. Gasificación por plasma	7	9	3	1

Aprovechamiento energético

Las cuatro alternativas se compararon con respecto a la eficiencia en la generación energética. Una alternativa será mejor respecto a otra cuando los gases generados en el proceso térmico tengan una mayor eficiencia para su valorización energética.

Para calificar este subcriterio tomamos como referencia la Tabla 23, que muestra la obtención de energía por cada uno de los procesos térmicos:

Tabla 23. Electricidad neta generada en procesos térmicos

Proceso	Electricidad Neta (kWh/ton MSW ^{**})
Gasificación por plasma	816
Gasificación convencional	685
Pirólisis	571
Incineración	544

Fuente: (Young, 2008)

^{**} Municipal Solid Waste

Se puede observar que el tratamiento de residuos mediante gasificación por plasma representa el proceso que permite la obtención de mayor de energía (kWh) por tonelada de residuo sólido.

El poder calorífico de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera tienen un rango entre los 6.000 y 10.000 kcal/kg, es una propiedad importante para el aprovechamiento energético, sin embargo, para analizar la recuperación energética, la cantidad de residuos a tratar en la planta es baja

La planta procesaría diariamente 32 ton/día, que corresponden a 11.680 ton/año. De acuerdo a la revisión bibliográfica, para que la recuperación energética sea interesante debe tener una capacidad superior 120.000 ton/año. La comercialización por su parte, depende del precio de venta de energía, que por economía de escala, no compite con los grandes generadores de energía, sin embargo el análisis se realizará de acuerdo a la capacidad de generación energética de los procesos térmicos estudiados, pues puede utilizarse para abastecer la misma planta.



- **Incineración vs. pirólisis.** En la pirólisis se generan 571 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la incineración que genera 544 KWh/h. De acuerdo a lo anterior, se considera que la pirólisis es ligeramente preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de incineración.

- **Incineración vs. gasificación.** En la gasificación se generan 685 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la incineración que genera 544 KWh/h. De acuerdo a lo anterior se considera que la gasificación es marcadamente preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de incineración.

- **Incineración vs. gasificación por plasma.** En la gasificación por arco plasma se generan 816 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la incineración que genera 544 KWh/h. De acuerdo a lo anterior se considera que la gasificación por plasma es extremadamente preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de incineración.

- **Pirólisis vs. gasificación.** En la gasificación se generan 685 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la pirólisis que genera 571 KWh/h. De acuerdo a lo anterior se considera que la gasificación es preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de pirólisis.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** En la gasificación por arco plasma se generan 816 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la pirólisis que genera 571 KWh/h. De acuerdo a lo anterior se considera que la gasificación por plasma es marcadamente preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de pirólisis.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** En la gasificación por arco plasma se generan 816 KWh por tonelada de residuo tratado, a diferencia de la gasificación que genera 685 KWh/h. De acuerdo a lo anterior se considera que la gasificación por plasma es ligeramente preferible con respecto al subcriterio de la obtención de energía (aprovechamiento energético) comparado con el proceso de gasificación convencional.

Respecto al aprovechamiento energético, se tiene la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 24. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de aprovechamiento energético.

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	1/2	1/7	1/9
A2. Pirólisis	2	1	1/5	1/7
A3. Gasificación	7	5	1	1/2
A4. Gasificación por plasma	9	7	2	1

4.5.2. Criterio Económico

Para la evaluación del criterio económico se determinaron los subcriterios de la inversión, los costos operativos y los ingresos. Estos subcriterios se analizaron con base en información cualitativa representada con un valor correspondiente en la escala de Saaty, (1980).

Para el criterio económico se optó por la metodología cualitativa debido a la dificultad relacionada con la obtención de los precios de inversión y de operación de las plantas de tratamiento existentes. Esta dificultad está asociada con la confusión de las diferencias de los sistemas de tratamiento térmico, por ejemplo, algunas de las plantas se hacen llamar pirolíticas, sin embargo existe un ingreso de oxígeno.

Inversión

Las cuatro alternativas se compararon respecto al subcriterio de inversión, tal como se muestra a continuación:

- **Incineración vs. pirólisis.** Se considera que la incineración es ligeramente preferible con respecto al subcriterio de la inversión que el proceso de pirólisis. Lo anterior obedece a que los costos de la inversión de los equipos incineradores son menores, una de las causas es que son más comunes en el mercado nacional que los hornos pirolíticos.



Otro aspecto importante es la complejidad del agua residual que generan los procesos de pirólisis (presencia de alquitranes), que obliga a incluir en la operación una planta de tratamiento de aguas residuales mucho más sofisticada.

- **Incineración vs. gasificación.** Los equipos gasificadores, por ser una tecnología que aún no está desarrollada en el país son más costosos que los hornos incineradores. Así mismo, los procesos de gasificación están relacionados principalmente con la generación de energía, incrementando los costos de inversión de los equipos en la planta. De acuerdo a lo anterior, se considera que la incineración es preferible con respecto al subcriterio de la inversión que el proceso de gasificación.

- **Incineración vs. gasificación por plasma.** El proceso de gasificación por plasma es una tecnología que actualmente se encuentra en desarrollo, inclusive a nivel mundial. De acuerdo a ello, la adquisición de los equipos gasificadores por arco plasma es mucho más limitada y por ende costosa con respecto a los equipos de incineración. Por lo anterior se concluye que la incineración es extremadamente preferible, con respecto al subcriterio de la inversión, que el proceso de incineración.

- **Pirólisis vs. gasificación.** Se considera que la gasificación es ligeramente preferible con respecto al subcriterio de la inversión que el proceso de pirólisis. Lo anterior obedece a la complejidad en los sistemas de tratamiento de: emisiones, de aguas residuales e instalación para el acopio de cenizas y escorias generadas en el proceso de pirólisis. La inversión del proceso de la pirólisis es un 8% mayor que la tecnología de gasificación (Wiley J. & Sons, 2010).

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de inversión, la pirólisis se considera preferible a la tecnología de gasificación por plasma. Si bien, los equipos requeridos en las operaciones de apoyo de la pirólisis (tratamiento de emisiones, aguas residuales, acopio de cenizas) incrementan los costos de inversión, la gasificación por arco plasma, por ser una tecnología en desarrollo a nivel mundial es más costosa que los procedimientos de pirólisis.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Comparado con la gasificación por arco plasma, la gasificación es una tecnología más desarrollada, encontrándose mayor cantidad de proveedores a nivel mundial. En su análisis Wiley, J. (2010), determinó que el costo de inversión de la gasificación por plasma es un 20% mayor que la tecnología de gasificación convencional. Por lo anterior se concluye



que, con respecto al subcriterio de la inversión, la gasificación convencional es preferible comparada con el proceso de gasificación por plasma.

Respecto al subcriterio de inversión, se presenta la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 25. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de inversión.

INVERSIÓN	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	2	4	9
A2. Pirólisis	1/2	1	1/2	4
A3. Gasificación	1/4	2	1	3
A4. Gasificación por plasma	1/9	1/4	1/3	1

Costo operativo

Las cuatro alternativas se compararon respecto al subcriterio del costo operativo, tal como se muestra a continuación:

- **Incineración vs. pirólisis.** Con respecto al subcriterio de los costos operativos, la incineración se considera ligeramente preferible a la tecnología de pirólisis. Esto es debido a que la pirólisis genera mayor cantidad de cenizas y escorias que incrementan los costos en el transporte del material a la celda de seguridad ubicada fuera de la provincia del Neuquén. Sumado a ello, está el mantenimiento de las operaciones de apoyo; tratamiento de aguas residuales, emisiones y secado de cenizas.
- **Incineración vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de los costos operativos, la incineración se considera ligeramente preferible a la tecnología de gasificación. Lo anterior obedece a que el costo operativo relacionado con el transporte para la disposición de cenizas generadas en el proceso de incineración es mayor que el de la tecnología de gasificación. Sumado a lo anterior está la complejidad del sistema de tratamiento de emisiones requerido en los procesos de incineración.



- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Si bien la gasificación por arco plasma es una tecnología costosa con respecto a su inversión, la ausencia de las cenizas hace que los costos operativos sean mucho menor, pues estos se incrementan significativamente con el transporte de este material a la celda de seguridad. Por otro lado, es importante mencionar que la gasificación por arco plasma requiere un mayor consumo energético comparado con la incineración. Sin embargo, con respecto al subcriterio de los costos operativos, la gasificación por arco plasma se considera extremadamente preferible a la tecnología de incineración.
- **Pirólisis vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de los costos operativos, la gasificación se considera marcadamente preferible a la tecnología de pirólisis. Lo anterior obedece al costo relacionado con el transporte y disposición final de la cantidad de cenizas y escoria generada en el proceso de pirólisis. Por otro lado, la generación de alquitranes en el sistema de pirólisis obliga a realizar mantenimientos más frecuentes en la totalidad de los equipos.
- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Comparado con la pirólisis, con respecto al subcriterio de costos operativos, la gasificación por arco plasma es extremadamente preferible. Lo anterior es debido a que la pirólisis tiene mayor costo relacionado con el transporte y disposición de las cenizas que la gasificación por arco plasma que no genera cenizas. El mantenimiento de los equipos por la presencia de alquitranes en el proceso de pirólisis también es una de las causas del incremento de los costos operativos.
- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Comparado con la gasificación convencional, con respecto al subcriterio de costos operativos, la gasificación por arco plasma es ligeramente preferible. Lo anterior es debido a que por las altas temperaturas, la gasificación por arco plasma vitrifica las cenizas, esto quiere decir que en sus costos operativos no incluye el transporte ni la disposición en celda de seguridad.

Respecto al subcriterio del costo operativo, se construye la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

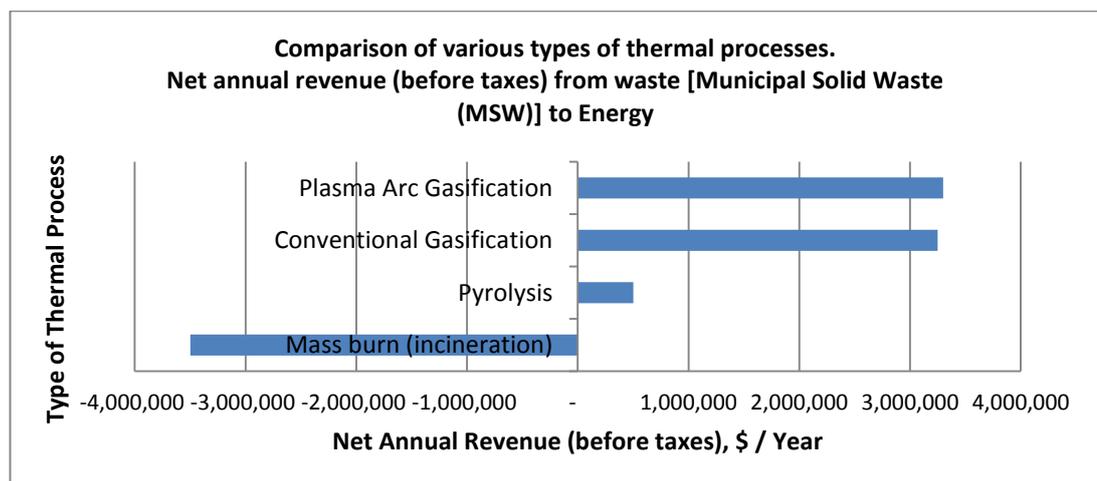
Tabla 26. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de costo operativo.

COSTO OPERATIVO	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	3	1/2	1/5
A2. Pirólisis	1/3	1	1/6	1/9
A3. Gasificación	2	6	1	1/3
A4. Gasificación por plasma	5	9	3	1

Ingresos

El cálculo del ingreso relacionado con la prestación del servicio de tratamiento de residuos, la venta de energía y del material vitrificado es complejo debido a que no se encuentran emplazadas todas las tecnologías de estudio en el país. Es por ello que para la emisión del juicio relacionado con los ingresos se utilizará la comparación de los ingresos anuales de las diferentes tecnologías térmicas del estudio desarrollado por Young, (2008), cuya gráfica se presenta a continuación:

Figura 14. Comparación de los diferentes tipos de tratamiento térmico.



Fuente: (Young, 2008)

Las cuatro alternativas se compararon con respecto al subcriterio de los ingresos, tal como se muestra a continuación:



- **Incineración vs. pirólisis.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la pirólisis es ligeramente preferible a la incineración. Lo anterior obedece principalmente a la venta de la cantidad de energía producida por la tecnología de pirólisis (Figura 14).

- **Incineración vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la gasificación se considera marcadamente preferible a la tecnología de incineración. Lo anterior está relacionado directamente con la mayor producción y venta de energía generada por la tecnología de gasificación comparada con la incineración.

- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la gasificación por arco plasma se considera extremadamente preferible a la tecnología de incineración. Lo anterior obedece a la mayor producción y venta de la energía generada por la tecnología de gasificación por arco plasma. Sumado a ello está el material vitrificado que puede comercializarse como materia prima p.ej. en la construcción.

- **Pirólisis vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la gasificación convencional se considera preferible a la tecnología de pirólisis. Lo anterior está relacionado con la mayor producción y venta de la energía generada por la gasificación, comparada con la cantidad de energía producida en la pirólisis.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la gasificación por arco plasma se considera marcadamente preferible a la tecnología de pirólisis. Lo anterior obedece a la producción y venta de la energía generada y del material vitrificado que puede usarse como materia prima p.ej. en la construcción.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de los ingresos, la gasificación por arco plasma se considera ligeramente preferible a la tecnología de la gasificación convencional. Lo anterior está relacionado con la producción y venta de la energía generada y por la venta del material vitrificado que puede usarse como materia prima p.ej. en la construcción.

Respecto al subcriterio de los ingresos, se construyó la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 27. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de ingresos.

INGRESOS	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	1/3	1/7	1/9
A2. Pirólisis	3	1	1/5	1/7
A3. Gasificación	7	5	1	1/2
A4. Gasificación por plasma	9	7	2	1

4.5.3. Criterio Social

Aceptación social

El subcriterio de aceptación social se evalúa a través de revisión bibliográfica relacionada con la percepción de la comunidad de cada uno de los tipos de tratamientos térmicos estudiados en la presente investigación.

Actualmente, en el país la tecnología de incineración, es una temática socialmente sensible. Organizaciones como Greenpeace, GAIA (Global Alliance for Incinerator Alternatives) lideran campañas en contra de la incineración como metodología de tratamiento de residuos sólidos urbanos. A su vez, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) en 2002, a través de la ley N° 747, prohíbe la incineración de los residuos patógenos. Por su parte, la provincia de Rosario en la ley N° 1355 del 2009, Artículo 33, prohíbe la eliminación de residuos sólidos urbanos por el método de incineración, en cualquiera de sus formas, con o sin recuperación de energía.

En ninguna normativa, se prohíbe la incineración de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. Sin embargo, la situación causa en la comunidad un rechazo a la incineración. No se percibe lo mismo con relación a las otras metodologías de tratamiento térmico estudiadas en la presente investigación.

Las cuatro alternativas se compararon respecto al subcriterio de la aceptación social, tal como se muestra a continuación:

- **Incineración vs. pirólisis.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la pirólisis se considera preferible a la tecnología de la



incineración. Lo anterior obedece al rechazo que ha tenido la incineración por parte de la comunidad.

- **Incineración vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la gasificación convencional se considera marcadamente preferible a la tecnología de la incineración. Lo anterior obedece al rechazo que ha tenido la incineración por parte de la comunidad.
- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la gasificación por arco plasma se considera marcadamente preferible a la tecnología de la incineración. Lo anterior obedece al rechazo que ha tenido la incineración por parte de la comunidad.
- **Pirólisis vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la gasificación convencional se considera igual preferible que la tecnología de pirólisis. Lo anterior obedece a que el rechazo por parte de la comunidad es dirigido específicamente a los procesos de incineración.
- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la gasificación por plasma se considera igual preferible que la tecnología de pirólisis. Lo anterior obedece a que el rechazo por parte de la comunidad es dirigido específicamente a los procesos de incineración.
- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de aceptación social, la gasificación por plasma se considera igual preferible que la tecnología de gasificación convencional. Lo anterior obedece a que el rechazo por parte de la comunidad es dirigido específicamente a los procesos de incineración.

Respecto al subcriterio de la aceptación social, se construyó la siguiente matriz de comparaciones pareadas:



Tabla 28. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de aceptación social.

ACEPTACIÓN SOCIAL	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	1/5	1/7	1/7
A2. Pirólisis	5	1	1	1
A3. Gasificación	7	1	1	1
A4. Gasificación por plasma	7	1	1	1

4.5.4. Criterio Técnico

En el criterio técnico se evaluaron los subcriterios de confiabilidad técnica y madurez de la tecnología.

Confiabilidad Técnica

Para la emisión de juicios en el subcriterio de confiabilidad técnica se tuvo en cuenta la siguiente información:

- Los tipos de residuos a tratar son los generados en la actividad hidrocarburífera, exceptuando los cortes de perforación, los suelos contaminados y los fondos de tanques.
- El poder calorífico de los residuos se encuentran en un rango entre 6.000 y 10.000 kcal/kg.
- La cantidad estimada de residuos a tratar son 11.680 ton/año, de acuerdo con lo calculado en las áreas de explotación.
- El objetivo del uso de los sistemas térmicos es la reducción del volumen de los residuos.

Las cuatro alternativas se compararon respecto al subcriterio de la confiabilidad técnica, tal como se muestra a continuación:

Incineración vs. pirólisis. La tecnología de incineración es aplicable para el tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. La pirólisis, por su parte, es una tecnología que puede



aplicarse a este tipo de residuos, sin embargo en el país ha sido usada para el tratamiento de la biomasa, como por ejemplo los residuos de madera y los residuos agrícolas. Con respecto a la capacidad, la incineración es un proceso usado para cantidades importantes de residuos, según bibliografía se estima su viabilidad a partir de 90.000 ton/año y los residuos a tratar son 11.680 ton/año. Por otro lado, en la reducción del volumen de los residuos, la incineración genera menor cantidad de residuo sólido (cenizas) que el tratamiento térmico por pirólisis.

De acuerdo a lo anterior, con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la incineración se considera marcadamente preferible que la tecnología de pirólisis.

- **Incineración vs. gasificación.** Al igual que la incineración, la gasificación es una tecnología aplicable al tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera y cumple el objetivo de la reducción del volumen de los residuos. La diferencia entre los sistemas radica en que la cantidad de residuos de referencia a tratar se ajusta mejor a los sistemas de gasificación. De acuerdo a lo anterior, con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la gasificación se considera ligeramente preferible que la tecnología de incineración.
- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la gasificación por arco plasma se considera ligeramente preferible que la tecnología de incineración. Lo anterior obedece a que la gasificación por arco plasma además de reducir el volumen de los residuos, los convierte en materia prima para otros procesos, p. ej. la construcción.
- **Pirólisis vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la gasificación se considera extremadamente preferible que la tecnología de pirólisis. Esto es debido a que los sistemas de pirólisis se han venido usando para el tratamiento de biomasa como por ejemplo los residuos agrícolas y de madera. Sumado a ello la reducción del volumen de los residuos es mucho mayor en los procesos de gasificación que en la tecnología de pirólisis.
- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la gasificación por arco plasma se considera extremadamente preferible que la tecnología de pirólisis. Lo anterior obedece a la no aplicabilidad de la pirólisis en el tratamiento de residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. Otra importante



razón es que el proceso de gasificación por arco plasma además de reducir el volumen de los residuos, los convierte en materia prima para otros procesos, p. ej. la construcción.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** Tanto la gasificación convencional como la gasificación por arco plasma, son tecnologías aplicables al tratamiento térmico de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera. La diferencia entre estas dos tecnologías es que la gasificación por arco plasma además de reducir el volumen de los residuos, los convierte en materia prima para otros procesos, p. ej. la construcción. De acuerdo a lo anterior, con respecto al subcriterio de confiabilidad técnica, la gasificación por arco plasma se considera ligeramente preferible que la tecnología de gasificación convencional.

Respecto al subcriterio de la confiabilidad técnica, se construyó la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 29. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio confiabilidad técnica.

CONFIABILIDAD TÉCNICA	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	6	1/2	1/2
A2. Pirólisis	1/6	1	1/8	1/9
A3. Gasificación	2	8	1	1/2
A4. Gasificación por plasma	2	9	2	1

Madurez de la tecnología

Debido a que la madurez incluye el desarrollo de la tecnología en el país y la disponibilidad de los equipos, previo a la evaluación se realiza una revisión de las tecnologías desarrolladas actualmente en el país y de los fabricantes de las mismas.

De las tecnologías. En Argentina, la incineración es la metodología de tratamiento térmico con mayor desarrollo. Actualmente existen diez (10) plantas a nivel nacional¹⁸ habilitadas bajo la categoría D10. "incineración en

¹⁸ Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable de la nación.



tierra”, establecida en la ley N° 24051/91. Cuatro (4) de las plantas incineradoras habilitadas desarrollan procesos de pirólisis, de acuerdo a la nómina de operadores de residuos industriales de la nación. Sin embargo, la misma nómina específica que dos (2) de las plantas cuentan con equipos tipo gasificador.

En el país se encuentran otras plantas incineradoras que operan bajo habilitación provincial, esto corresponde principalmente a las provincias que por constitución prohíben el ingreso de residuos peligrosos a su territorio.

El registro nacional de operadores de residuos industriales fue analizado con el fin de hacer seguimiento a las tecnologías de tratamiento para residuos sólidos peligrosos desarrolladas en el país. De acuerdo a las especificaciones de las metodologías aprobadas por la autoridad ambiental, se percibe la confusión entre las definiciones técnicas de los tratamientos por incineración, pirólisis y gasificación. La razón de dicha confusión, puede atribuirse a la ausencia de regulaciones y definiciones dentro del marco normativo nacional, considerándose solamente la incineración como método de tratamiento.

Si bien, existen habilitaciones por parte de la autoridad nacional de aplicación para la metodología de pirólisis (ausencia de oxígeno), ninguna de las empresas analizadas cumplen con los requerimientos técnicos del proceso para definirse como “pirólisis”. La experiencia encontrada en el país de la aplicación de la pirólisis es principalmente la generación de carbón¹⁹ a partir de biomasa (residuos vegetales).

El tratamiento térmico a través de la tecnología de gasificación por plasma aún no se encuentra desarrollado en el país.

De los fabricantes. Existen diferentes empresas fabricantes de hornos para el tratamiento de residuos industriales, como: HOSEMA, Caltec S.R.L., Lindberg Argentina S.A., INCOL S.A., que en su mayoría desarrollan sus equipos bajo licencias internacionales como: Techrol (UK), EMCOTEK (EU), ATI (Francia), entre otros.

Teniendo en cuenta la información de las tecnologías y de los fabricantes de los sistemas térmicos para el tratamiento de residuos peligrosos, se compararon las cuatro alternativas con respecto al subcriterio de la madurez de la tecnología, tal como se muestra a continuación:

¹⁹ Biorefinería Santa Ana, Misiones, Argentina.



- **Incineración vs. pirólisis.** Con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología, la incineración se considera marcadamente preferible que la tecnología de pirólisis. Esto es debido a que en el país el proceso de incineración ha sido el más usado y se encuentran más proveedores en el mercado nacional.

- **Incineración vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología, la incineración se considera preferible a la tecnología de gasificación convencional. Lo anterior obedece a que en el país el proceso de incineración ha sido el más usado y se encuentran más proveedores en el mercado nacional. Además de ello los equipos llamados pirolíticos son en realidad equipos gasificadores pues trabajan con cantidades limitadas de oxígeno.

- **Incineración vs. gasificación por plasma.** Con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología, la incineración se considera extremadamente preferible a la tecnología de gasificación por arco plasma. Esto es debido a que el proceso de gasificación por arco plasma es una tecnología que aún se encuentra en desarrollo a nivel mundial.

- **Pirólisis vs. gasificación.** Con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología, la gasificación convencional se considera ligeramente preferible a la tecnología de pirólisis. Esto es debido a que los equipos llamados pirolíticos son en realidad equipos gasificadores, pues trabajan con cantidades limitadas de oxígeno.

- **Pirólisis vs. gasificación por plasma.** Tanto la tecnología de gasificación por arco plasma como la pirólisis no tienen gran desarrollo en el país. Por un lado, la pirólisis se ha utilizado para el tratamiento de los residuos de biomasa, y por el otro, no se ha emplazado la primer planta térmica por arco plasma para el tratamiento de residuos. De acuerdo con lo anterior, para el subcriterio de madurez de la tecnología, la pirólisis se considera ligeramente preferible comparado con la tecnología de gasificación por plasma.

- **Gasificación vs. gasificación por plasma.** De acuerdo con el subcriterio de madurez de la tecnología, la gasificación convencional se considera preferible a la tecnología de gasificación por plasma. Lo anterior es debido a que, en el país, no se ha emplazado la primer planta térmica por arco plasma para el tratamiento de residuos.



Respecto al subcriterio de la madurez de la tecnología, se construyó la siguiente matriz de comparaciones pareadas:

Tabla 30. Matriz de comparación por pares que muestra la preferencia de las alternativas con respecto al subcriterio de madurez de la tecnología.

MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA	A1.Incineración	A2.Pirólisis	A3.Gasificación	A4.Gasificación por plasma
A1. Incineración	1	7	5	9
A2. Pirólisis	1/7	1	1/2	2
A3. Gasificación	1/5	2	1	5
A4. Gasificación por plasma	1/9	1/2	1/5	1



CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

Una vez desarrolladas las matrices de comparación por pares se calculó la prioridad de cada uno de los elementos que se están comparando. Para analizar detalladamente los cálculos matemáticos que implica este proceso se sugiere revisar el Anexo IV.

5.1. Prioridad Respecto a la Meta Global

En la emisión de juicios, en esta tesis, no se contó con la participación de expertos en sistemas de tratamiento térmico. Esta metodología fue llevada a cabo a través de la revisión bibliográfica, sin embargo, debido a la importancia de la emisión de juicios de los expertos en el desarrollo de la metodología AHP, se tomó el vector propio de la matriz de los criterios respecto a la meta global del estudio *“selección de sistemas de tratamiento de residuos sólidos residenciales a través de técnicas multicriterio”*.

Tabla 31. Vector propio de la matriz que muestra la preferencia de los criterios para la evaluación de los sistemas de tratamiento térmico.

Criterios	Vector propio de la matriz de criterios
Ambiental	0.328
Económico	0.211
Social	0.234
Técnico	0.227

Fuente: (Urbano, Osorio, & Manyoma, 2012)

Una vez establecida la prioridad con respecto a la meta global, se procede a calcular la prioridad con respecto a los criterios ambiental, económico, social y técnico, determinados en los capítulos anteriores.

5.2. Prioridad Respecto a los Criterios

Previo a realizar el proceso de síntesis, es decir, las prioridades de las alternativas respecto a la meta global, se determinó el orden de importancia de los subcriterios identificados en cada uno de los criterios: ambiental, económico, social y técnico.

Una vez obtenido el vector de prioridades para cada criterio, se procedió a priorizar las alternativas con base en el desarrollo de las matrices de comparación por pares realizadas en el capítulo anterior.

El procedimiento matemático para efectuar la síntesis involucra el cálculo de valores característicos que se pueden detallar en el Anexo IV. Sin embargo, a continuación se resumen los pasos, que dan una buena aproximación de prioridades sintetizadas.

Paso 1. Sumar los valores de cada columna de la matriz de comparación por pares.

Paso 2. Dividir cada uno de los elementos de la matriz de comparación por pares entre el total de su columna; la matriz resultante se conoce como matriz normalizada.

Paso 3. Calcular la media de los elementos de cada hilera de la matriz normalizada (λ).

Paso 4. Calcular la relación de consistencia (CR). Si el valor de la relación de la consistencia es de 0.1 o inferior, se considera que la emisión de juicios fue aceptable.

5.2.1. Criterio Ambiental

Como resultado de la matriz de comparación de los subcriterios identificados dentro del criterio ambiental, se observa en la Tabla 32 que la ubicación geográfica, con un 51.3%, es el subcriterio más importante para la selección del sistema de tratamiento térmico. Por tratarse de un sistema de tratamiento térmico de residuos peligrosos, las emisiones con un 28%, ocupa un lugar importante en la priorización de los subcriterios ambientales. El aprovechamiento energético por su parte no es un aspecto de gran importancia (5.9%), pues actualmente no se encuentra incluido como requisito normativo a diferencia de los países europeos.

Tabla 32. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios ambientales para la selección del sistema de tratamiento térmico.

Subcriterios	Vector Propio
Emisiones	0.280
Ubicación geográfica	0.513
Generación de cenizas	0.148
Aprovechamiento energético	0.059
Relación de consistencia	0.01

Una vez obtenido el vector de prioridades para el criterio ambiental, se procedió a priorizar las alternativas con base en el desarrollo de las matrices de comparación por pares (Tabla 33).

Tabla 33. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios ambientales con respecto a las alternativas.

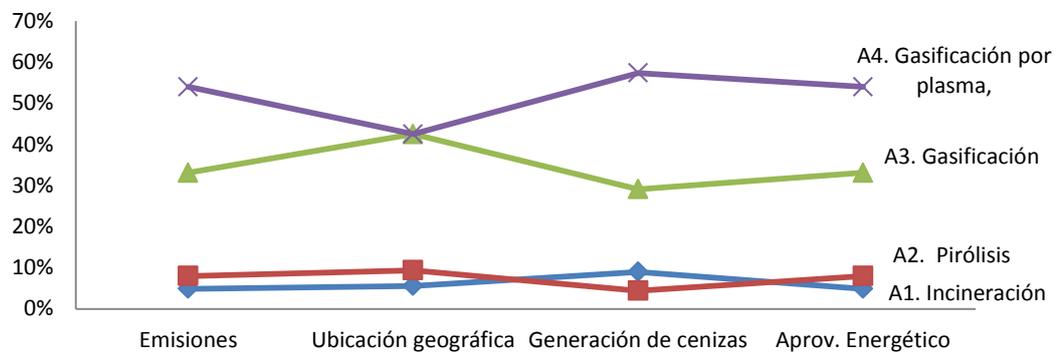
CRITERIO AMBIENTAL	Emisiones	Ubicación geográfica	Generación de cenizas	Aprovechamiento Energético
A1. Incineración	0.049	0.056	0.090	0.049
A2. Pirólisis	0.080	0.094	0.044	0.080
A3. Gasificación	0.331	0.425	0.291	0.331
A4. Gasificación por plasma	0.540	0.425	0.574	0.540
Relación de consistencia	0.015	0.006	0.062	0.015

La relación de consistencia para todos los vectores es menor a 0.10, quiere decir que la emisión de juicios dada a través de la revisión literaria fue consistente.

Con el fin de facilitar el análisis, se grafican los resultados en la Figura 15.

En la gráfica se muestra el porcentaje del nivel de preferencia de las alternativas con respecto a los subcriterios ambientales. En la misma, se puede determinar que la gasificación convencional y la gasificación por arco plasma son las alternativas con mayor preferencia debido a la baja complejidad de las emisiones de gases y material particulado que indirectamente afectan en menor medida las actividades que se desarrollan alrededor.

Figura 15. Análisis de las alternativas en función de los criterios ambientales.



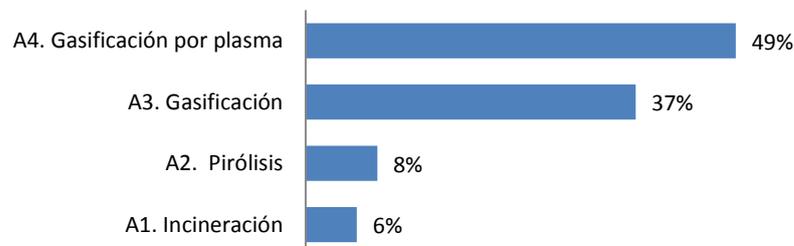
Con respecto a las cenizas, debido a las altas temperaturas, la complejidad es más baja. En el caso de la gasificación por arco plasma, en cambio de cenizas se produce un material vítreo, por ello se puede observar el mayor nivel de preferencia en este subcriterio.

Por último, los parámetros de operación (temperatura y requerimiento de oxígeno) en las alternativas 3 y 4 permiten una mayor eficiencia en el aprovechamiento energético.

Selección de la alternativa con respecto al Criterio Ambiental

Como resultado de la multiplicación entre la matriz de los vectores de prioridad de cada uno de los subcriterios y el vector de prioridad del criterio ambiental se obtiene la alternativa de mayor preferencia (Figura 16).

Figura 16. Priorización de alternativas con respecto al criterio ambiental.



La gráfica muestra que con respecto al criterio ambiental, la alternativa de mayor preferencia, con un 49%, es la gasificación por arco plasma.

5.2.2. Criterio Económico

Como resultado de la matriz de comparación de los subcriterios identificados dentro del criterio económico, se observa que el costo operativo, con un 68.1%, es el subcriterio más importante para la selección del sistema de tratamiento térmico (Tabla 34).

Tabla 34. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios económicos para la selección del sistema de tratamiento térmico.

Subcriterios	Vector propio
Inversión	0.103
Costo operativo	0.681
Ingresos	0.216
Relación de consistencia	0.002

La inversión es el subcriterio de menor importancia (10.3%) a la hora de evaluar las alternativas con respecto al criterio económico. Lo anterior obedece a que los costos operativos y los ingresos son los aspectos que mantienen el proyecto y que a su vez están relacionados con la inversión; a mayor ingreso y menor costo operativo, el tiempo de retorno de la inversión se reduce.

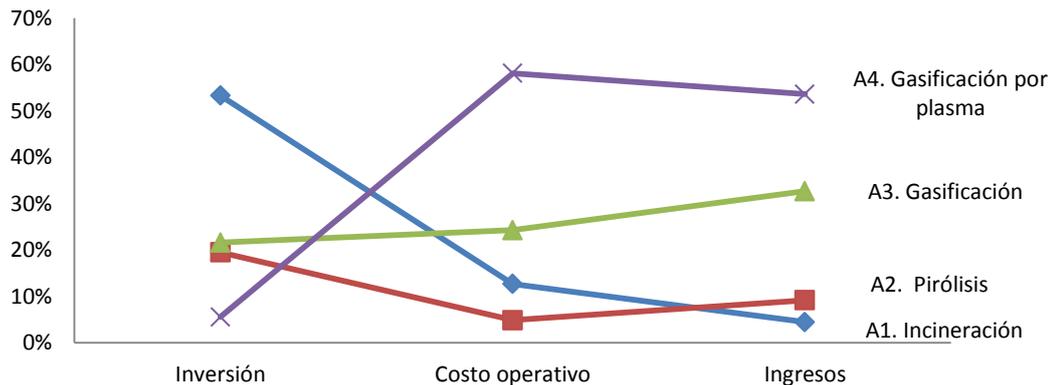
Una vez obtenido el vector de prioridades para el criterio económico, se procedió a priorizar las alternativas con base en el desarrollo de las matrices de comparación por pares (Tabla 35).

Tabla 35. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios económicos con respecto a las alternativas.

CRITERIO ECONÓMICO	Inversión	Costo operativo	Ingresos
A1. Incineración	0.533	0.127	0.045
A2. Pirólisis	0.195	0.049	0.092
A3. Gasificación	0.216	0.243	0.327
A4. Gasificación por plasma	0.056	0.581	0.536
Relación de consistencia	0.072	0.018	0.039

La relación de consistencia para todos los vectores es menor a 0.10, quiere decir que la emisión de juicios dada a través de la revisión literaria fue consistente. Con el fin de facilitar el análisis, se grafican los resultados de la siguiente manera:

Figura 17. Análisis de las alternativas en función de los criterios económicos.

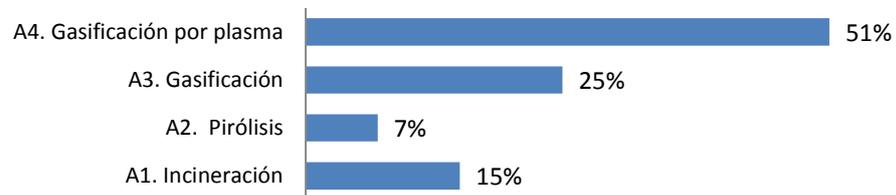


En la gráfica se muestra, en porcentaje, el nivel de preferencia de las alternativas con respecto a los subcriterios económicos. Se puede observar que la gasificación por plasma es la alternativa de menor preferencia en los costos de inversión y viable en relación a los costos operativos. Este comportamiento está asociado a que, a diferencia de las otras alternativas, la gasificación por plasma no genera cenizas, quiere decir que no requiere el transporte al lugar de disposición final, en este caso fuera de la provincia del Neuquén. Así mismo, la producción de un material vítreo y la mayor eficiencia para el aprovechamiento energético, hace de la gasificación por arco plasma la alternativa de mayor preferencia con respecto a los ingresos.

Selección de la alternativa con respecto al Criterio Económico

Como resultado de la multiplicación entre la matriz de los vectores de prioridad de cada uno de los subcriterios y el vector de prioridad del criterio económico se obtiene la alternativa de mayor preferencia (Figura 18).

Figura 18. Priorización de alternativas con respecto al criterio económico.



La gráfica muestra que con respecto al criterio económico, con un 51%, la alternativa de mayor preferencia es la gasificación por arco plasma.

5.2.3. Criterio Social

En el caso del criterio social, solamente se tuvo en cuenta el subcriterio de la aceptación social. Por esta razón, no se realizó matriz de comparación de los subcriterios sociales y se continuó, con base en el desarrollo de la matriz de comparación por pares, con la priorización de alternativas (Tabla 36).

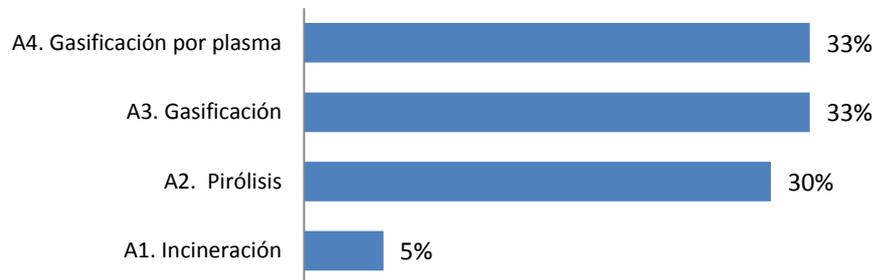
Tabla 36. Vector propio que muestra la importancia del criterio social con respecto a las alternativas.

CRITERIO SOCIAL	Orden de Importancia de las Alternativas
A1. Incineración	0.051
A2. Pirólisis	0.300
A3. Gasificación	0.325
A4. Gasificación por plasma	0.325
Relación de consistencia	0.005

La relación de consistencia para el vector propio de orden de importancia de las alternativas es menor a 0.10, quiere decir que la emisión de juicios dada a través de la revisión literaria fue consistente.

A continuación se muestra de manera gráfica los datos generados en la Tabla 36:

Figura 19. Priorización de alternativas con respecto al criterio social.



De acuerdo a la Figura 19, la gasificación por arco plasma y la gasificación convencional tienen mayor preferencia relacionada con el subcriterio de aceptación social con respecto a los demás sistemas de tratamiento térmico. Lo anterior obedece a que, específicamente para la incineración, existe un notable rechazo social, cuya prohibición se está incluyendo en la normativa de algunas de las provincias del país. En los procedimientos de gasificación por su parte, se percibe mayor aceptación, esto se relaciona con la capacidad del aprovechamiento energético de estas tecnologías.

5.2.4. Criterio Técnico

Como resultado de la matriz de comparación de los subcriterios identificados dentro del criterio técnico se observa en la Tabla 37 que la confiabilidad técnica, con un 87.5%, es el subcriterio más importante para la selección del sistema de tratamiento térmico.

Tabla 37. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios técnicos para la selección del sistema de tratamiento térmico.

Subcriterios	Orden de importancia
Confiabilidad técnica	0.875
Madurez de la tecnología	0.125
Relación de consistencia	0.00

La confiabilidad técnica del sistema de tratamiento térmico está asociada con la aplicabilidad de la tecnología al tipo de residuo de estudio, a la capacidad y al cumplimiento con uno de los principales objetivos de este tipo de tratamientos; la reducción del volumen de residuos.

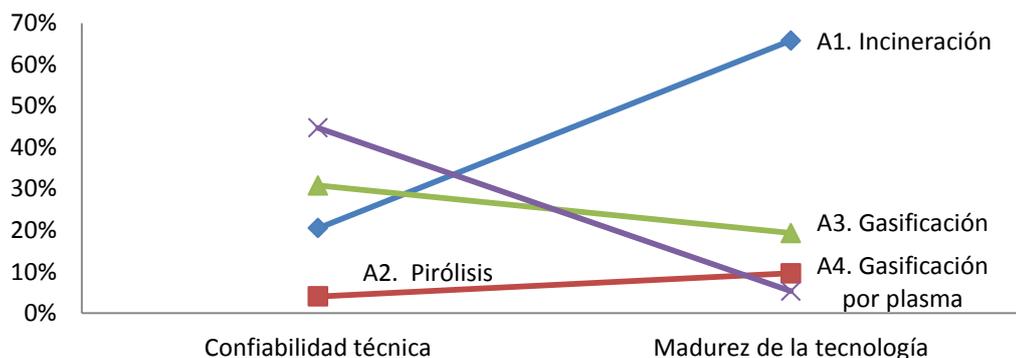
Una vez obtenido el vector de prioridades para el criterio técnico, se procedió a priorizar las alternativas con base en el desarrollo de las matrices de comparación por pares (Tabla 38).

Tabla 38. Vector propio que muestra la importancia de los subcriterios técnicos con respecto a las alternativas.

CRITERIO TÉCNICO	Confiabilidad técnica	Madurez de la tecnología
A1. Incineración	0.205	0.658
A2. Pirólisis	0.040	0.096
A3. Gasificación	0.308	0.193
A4. Gasificación por plasma	0.447	0.053
Relación de consistencia	0.025	0.034

La relación de consistencia para todos los vectores es menor a 0.10, quiere decir que la emisión de juicios dada a través de la revisión literaria fue consistente. Con el fin de facilitar el análisis, se grafican los resultados de la siguiente manera:

Figura 20. Análisis de las alternativas en función de los criterios técnicos.



El sistema que presenta mayor preferencia, relacionada con la madurez de la tecnología, es la incineración (65.8%).

En el país existen diferentes proveedores de incineradores (principalmente hornos de tipo rotativo), lo que permite el fácil acceso a los repuestos y a los materiales consumibles. Así mismo, se proporciona de manera rápida la información técnica, el mantenimiento y, por la cantidad de empresas autorizadas para el tratamiento térmico de residuos peligrosos registrados bajo

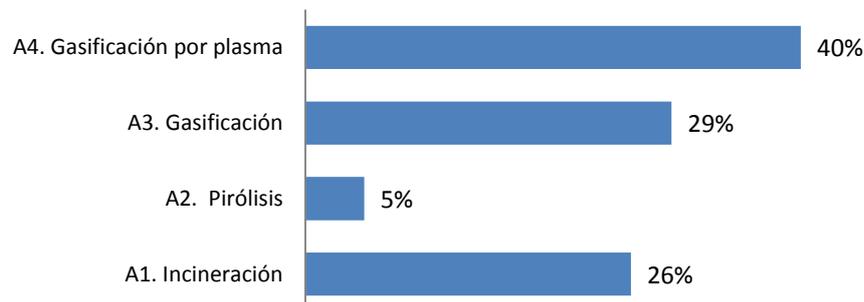
esta operación, se halla con mayor facilidad el recurso humano con experiencia en el manejo de este tipo de sistemas.

A diferencia de la incineración, con un 5.3%, la gasificación por arco plasma no es preferible en relación a la madurez de la tecnología, esto obedece a que es una tecnología que hasta ahora se encuentra en desarrollo a nivel mundial. Con respecto a la confiabilidad técnica, con un 44.7%, tiene mayor preferencia, debido a que los residuos generados en la actividad hidrocarburífera son aplicables en el uso del sistema por arco plasma y además la reducción de volumen de residuos es mucho mayor comparada con las otras tecnologías.

Selección de la alternativa con respecto al Criterio Técnico

Como resultado de la multiplicación entre la matriz de los vectores de prioridad de cada uno de los subcriterios y el vector de prioridad del criterio técnico se obtiene la alternativa de mayor preferencia (Figura 21).

Figura 21. Priorización de las alternativas con respecto al criterio técnico.



La gráfica muestra que con respecto al criterio económico, con un 40%, la alternativa de mayor preferencia es la gasificación por arco plasma.

5.3. Selección del Sistema de Tratamiento Térmico

Una vez obtenidos los vectores de la priorización de las alternativas para cada uno de los criterios: ambiental, económico, social y técnico, se procedió a la etapa final para determinar el sistema de tratamiento térmico óptimo de acuerdo a las condiciones establecidas en los residuos de la industria hidrocarburífera de la provincia del Neuquén.

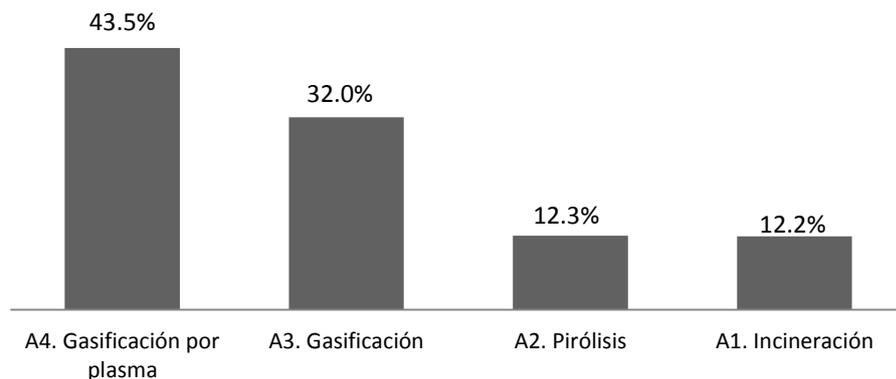
La Tabla 39 resume los vectores resultantes de las operaciones realizadas a partir de las matrices pareadas, así mismo el vector propio de la priorización en términos de importancia de los criterios inicialmente establecidos. Los pesos de este último vector fueron tomados de información secundaria.

Tabla 39. Multiplicación de los vectores propios resultantes de la priorización de las alternativas con respecto a los criterios por el vector propio de la matriz de criterios.

ALTERNATIVAS	Ambiental	Económico	Social	Técnico		Criterios	Vector Propio de la Matriz de Criterios
A1. Incineración	0.059	0.151	0.051	0.261	X	Ambiental	0.328
A2. Pirólisis	0.082	0.073	0.300	0.047		Económico	0.211
A3. Gasificación	0.373	0.259	0.325	0.294		Social	0.234
A4. Gasificación por plasma	0.486	0.517	0.325	0.398		Técnico	0.227

La priorización de las alternativas de selección se obtiene a través de la multiplicación matricial de los vectores presentados en la Tabla 39 (Anexo IV) cuyo resultado se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Priorización de las alternativas de selección de tratamiento térmico.



Se observa que, como resultado de la aplicación de la metodología, la gasificación por plasma es la alternativa preferible para el tratamiento térmico de los residuos peligrosos generados en la industria hidrocarburífera. Con un 43.5%, resulta beneficiada desde todos los criterios analizados, estos son: el

ambiental, el económico, el social y el técnico. El mayor porcentaje (51.7%) se obtuvo en el criterio económico debido a que la alternativa presenta, tanto mayor ingreso relacionado con el aprovechamiento de subproductos, como el menor costo operativo por la mínima generación de cenizas del proceso, que minimizan los costos asociados al transporte.

La gasificación convencional, con un 32%, ocupa el segundo lugar en la priorización de las alternativas. Es también una tecnología viable para el tratamiento de residuos peligrosos generados en la industria hidrocarburífera. El mayor porcentaje (37.3%) se obtuvo en el criterio ambiental debido principalmente al aprovechamiento del gas síntesis para la generación energética.

Por otro lado, la pirólisis y la incineración con un 12.3% y 12.2% respectivamente, son las alternativas menos preferidas de acuerdo al desarrollo de la metodología AHP de la presente investigación. Estas alternativas no son favorecidas principalmente en los criterios ambiental y económico. Son tecnologías complejas desde el punto de vista de generación de residuos como: las cenizas y el material particulado, lo cual trae como consecuencia un incremento en el subcriterio de costo operativo, el más importante del criterio económico.

Por otra parte, de acuerdo con lo desarrollado en esta sección se muestra la posibilidad de analizar un problema medioambiental del tratamiento de residuos sólidos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera a través de un enfoque multicriterio, y específicamente la formulación del modelo AHP para tomar una decisión sobre la mejor estrategia de tratamiento de dichos residuos, considerando diversos criterios y subcriterios. Es de anotar que el proceso, con la participación de expertos, en la emisión de juicios desde las diferentes áreas, es más completo que con base solamente en revisión bibliográfica, tal como se desarrolló la presente investigación.

En consecuencia, de acuerdo con la forma como se planteó el caso de estudio se puede observar que aunque la alternativa más utilizada para el tratamiento de los residuos peligrosos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén es la incineración, según los resultados, la alternativa recomendada de acuerdo a los criterios determinados, aunque se encuentra en desarrollo a nivel mundial, es la gasificación por arco plasma.



CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES

La principal característica de los residuos generados en la actividad hidrocarburífera es su alto poder calorífico, que oscila entre 6.000 y 10.000 kcal/kg lo cual hace aplicable un sistema de tratamiento térmico.

La decisión de escoger una estrategia de tratamiento debe tener en cuenta criterios de tipo técnico (confiabilidad técnica y madurez de la tecnología), económico (inversión, costo operativo, ingresos), ambiental (emisiones, ubicación geográfica, aprovechamiento energético, generación de cenizas) y social (aceptación social), que se deben analizar sistémicamente para aportar una adecuada gestión de los residuos.

Este modelo de decisión multicriterio propuesto puede ser aplicado en otras provincias, para encontrar una estrategia de tratamiento de los residuos, con un manejo analítico y objetivo de los datos y considerando los criterios cuantitativos y cualitativos evaluados a través de juicios emitidos por expertos.

Las tecnologías de co-procesado, microondas y vitrificación, no fueron incluidas en la evaluación de las alternativas a través del modelo multicriterio debido a que son tratamientos que dependen de otro proceso, trata otro tipo de residuos o es un tratamiento complementario a los sistemas térmicos. El co-procesado depende del proceso de fabricación del clínquer, cuya planta está ubicada fuera de la provincia del Neuquén incrementando de manera significativa los costos asociados al transporte de los residuos. En el caso del tratamiento por microondas, es aplicable específicamente a residuos hospitalarios o a operaciones de secado por ejemplo lodos generados en el mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales. Por último, la vitrificación puede considerarse como un proceso complementario a los sistemas de tratamiento térmico que generen cenizas, como es el caso de la incineración, pirólisis y gasificación.

De acuerdo con la aplicación del modelo de decisión multicriterio propuesto, la gasificación por arco plasma es la tecnología preferible para el tratamiento de residuos peligrosos generados en la industria hidrocarburífera de la provincia del Neuquén, donde, con base en las pruebas piloto que se han realizado con la tecnología, se consideran como una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos, recuperar su energía y aprovechar los subproductos (ceniza vitrificada). Sin embargo, es una tecnología que aún en



los países desarrollados se encuentra en estado de aplicación y aprobación de las regulaciones legales necesarias. Debido a esto no es viable para el municipio de Senillosa la instalación de un sistema de gasificación por arco plasma para el tratamiento de los residuos sólidos generados en la actividad hidrocarburífera de la provincia del Neuquén. Se podría pensar en la gasificación convencional como tecnología aplicable, ocupando un segundo lugar en el ranking de preferencia de la metodología del AHP (Analytical Hierarchy Process).



BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, M., & Paul, T. (2009). De-novo formation of dioxins and furans and the memory effect in waste incineration flue gases. *Waste Manag.* 739-748.
- Aguirre, E. (2007). El petróleo una visión sencilla de nuestra industria petrolera. *El Cid editor-Ingeniería*, 80.
- Al Sallem, S., & Lettieri, P. &. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW). *Waste Management*, 2625-2643.
- Alessi, A. (2007). Informe Ambiental. *Loteo Los Alamos*. Senillosa, Neuquén, Argentina.
- Alfonso, A. (2010). Método de selección de tecnologías de procesos aplicado a una planta de gas natural licuado, GNL. Convención Internacional de gas AVPG. Caracas, Venezuela.
- Appendino, P., Ferraris, M., Matekovits, I., & Salvo, M. (2004). Production of glass ceramic bodies from the bottom ashes of municipal solid waste incinerator. *J eur. Ceram Soc* 24, 803-810.
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. *A review waste management*, 625-639.
- Arena, U., Di Gregorio, F., & Amorese, C. &. (2011). A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic. *Waste Management*, 1494-1504.
- Arena, U., Mastellone, M., & Perugini, F. (2003). The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study. *Chemical Engineering Journal* , 207-222.
- Ávila Mogollón, R. (1996). Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible. Proyecto FAO. Santiago , Chile.
- Bébar, L., Stehlík, P., & Havlen, L. &. (2005). Analysis of using gasification and incineration form thermal processing of wastes. *Journal applied thermal engineering*, 1045-1055.
- Bernal, D. (2000). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. instituto Cinara*. Cali, Valle del Cauca, Colombia.



- Bicgroup. (s.f.). Recuperado el 15 de Julio de 2014, de www.bicgroup.com.sg/index.php: <http://www.bicgroup.com.sg/index.php>
- Bogner, J., Abdelrafie, M., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., y otros. (2007). Climate change 2007: mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 587-613.
- Bonato, F. (2000). Tecnologías para el tratamiento de residuos industriales por termodestrucción. Buenos Aires, Argentina.
- Bontoux, L. (Marzo de 1999). The incineration of waste in Europe: Issues and perspectives. *European Comission Joint Research Centre*. Sevilla.
- Boughton, B., & Horvath, A. (2006). Environmental assessment of shredder residue management. *Resour. Conserv. Recycl.* 47, 1-25.
- Brandrup, J., Bittner, M., & Michaeli, W. &. (1996). *Recycling and recovery of plastics*. New York: Hanser Publ.
- Calvo, L., Gil, M., Otero, M., & Morán, A. &. (2012). Gasification of rice straw in fluidized bed gasifier for syngas application in close coupled boiler gasifier systems. *Bioresource Technology* , 206-214.
- Caputo, A., Palumbo, M., Pelegagge, P., & Scachia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Journal of Biomass & Energy* 28, 35-51.
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Barcelona: Díaz de Santos, S.A.
- Castillo, M. (2008). *Toma de decisiones en las empresas: entre el arte y la técnica*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. (Septiembre de 2005). Recuperado el 05 de Abril de 2013, de http://archive.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-02.pdf
- Cho, Y. &. (1981). Heterogenous model for moving bed coal gasification reactors. *Ing. Eng. Chem. Process*, 314-318.
- Consonni, S., & Giugliano, M. &. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part A: mass and energy balances. *Waste management* 25, 123-135.



- Curci, E., Calleja, C., Videla, S., & Galvez, J. &. (1999). *Biorremediación de suelos contaminados cn hidrocarburos. Laboratorio de bioprocesos. Universidad Nacional de Cuyo. Neuquén, Neuquén, Argentina.*
- Daskalopoulos, E., & Badr, O. &. (1997). Economic and environmental evaluations of waste treatment and disposal technologies for municipal solid waste. *Applied Energy Vol. 58, N° 4., 209-255.*
- Dorn, C., Behrend, R., Giannopoulos, D., Napolano, L., B, G., James, V., y otros. (2015). KPI and LCA evaluation of integrated microwave technology for high temperature processes. *Procedia CIRP, 492-497.*
- EPA. (1989). *CFR 40, Environmental Protection Agency.* Recuperado el 18 de Abril de 2014, de Environmental Protection Agency: www.epa.gov
- Escobar, M., & Moreno, J. (1997). Problemas de gran tamaño en el proceso AHP: aplicación de método a un caso simplificado del Plan Nacional de Regadíos. *Estudios de Economía Aplicada, 8., 25-40.*
- Espinoza, E., Amal, P., Rodríguez, M., Vercesi, M., & Torres, C. (2006). Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos en la Unidad Económica Loma La Lata (UELLL). Neuquén, Neuquén, Argentina.
- G.R.M Enviroment S.A. (2008). Tecnología para la vitrificación de residuos. Ingeniería Ambiental. Buenos Aires, Argentina.
- Genivar, Ramboll, Whitford, J., Deloitte, & URS. (30 de Mayo de 2007). The Regional Minicipality of Haton. . *Step 1B: EFW Technology Overview.* Oakville, Ontario, Canadá.
- Gomez, D., & R., A. (2009). Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. *Journal Hazardous Materials , 614-626.*
- Gómez, J., & González, J. (2009). Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por Petróleos del Norte S.A. (Departamento del Cesar) . *Tesis Magister en Química. Universidad Pontificia Bolivariana.* Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Greenpeace. (s.f.). Recuperado el 7 de Agosto de 2014, de Incineración y Salud. Conocimientos actuales sobre los impactos de las incineradoras en la salud humana: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/incineracion-y-salud-2.pdf>



- Guerrero, J. (2002). Desarrollo de un modelo de decisión para realizar la asignación presupuestal del portafolio de inversión en publicidad en General Motors Colmotores. Bogotá, Colombia.
- Harker, P. (1987). The incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process. *Mathematical Modelling* 9., 837-848.
- Hauk, R., Spindeldreher, O., Usdrovoski, N., Stadmüller, J., & Zimmer, J. &. (2004). ConTherm-Thermische Abfall verwertung im kraftwerk durch kraftwerksintegrierte pyrolyse von hezwertreichen Ersatzbrennstoffen (ConTherm.thermal utilization of RDF by pyrolysis Integrated into the power station. *VGB Power Tech*, 66-71.
- Hernández Palencia, R. B. (2007). Refinación del petróleo. *El Cid Editor* , 50.
- IDAE. (2011). Situación potencial de valorización energética directa de residuos. *Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid, España.
- Indaver. (s.f.). *Indaver*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2014, de www.indaver.be: <http://www.indaver.be/waste-treatment/waste-to-energy/fluidised-bed-incinerator.html>
- INDEC. (2010). *INDEC*. Recuperado el 12 de Julio de 2015, de http://www.censo2010.indec.gov.ar/index_cuadros.asp
- Instituto de desarrollo Industrial Tecnológico y de Servicios IDITS. (2005). *Análisis de competitividad de las cadenas productivas en la provincia de Mendoza. Primer informe sectorial de empresas de servicios para el sector petrolero y gas*. Mendoza.
- ISWA. (2006). *The International Solid Waste Association*. Recuperado el 15 de Mayo de 2014, de Management of bottom ash from WtE plants.: <http://www.iswa.org/>
- Lage-Filho, L. (2004). Iniciativa para la integración de la infraestructura regional suramericana (IIRSA). Selección de municipios para el desarrollo local (SMDL) . Caracas, Venezuela.
- Leuschke, F., Beckwech, S., Ratschow, L., & Werther, J. (2008). Flue gas desulphurization in a circulating fluidized bed: investigation after 10 years of successful commercial operation at the facility of Pilsen. *Tech Innovation*, 943-948.
- Lin, K., Wang, K., Tzeng, B., & Lin, C. (2004). The hydration characteristics and utilization of slag obtained by the vitrification of MSWI fly ash. . *Waste Management* 24, 199-205.



- López, A., Marco, I., Caballero, B., & Laresgoiti, M. &. (2010). Pyrolysis of municipal plastic wastes: influence of raw composition. *Waste Management*, 620-627.
- Malkow, T. (2004). Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. *Waste Management*, 53-79.
- Martínez, D. (2006). Tesis: Determinación de la viabilidad técnico-económica de la utilización de aceite usado como fuente primaria de energía en plantas de generación eléctrica. Facultad de ingeniería eléctrica. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
- Mata, M. (2014). *Simulación y diseño de un reactor para gasificación por plasma*. Recuperado el 07 de Mayo de 2015, de <http://www.acimacongreso.com/mata.html>
- Ministerio de Salud, Perú. (s.f.). *Ministerio de Salud*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2012, de <http://www.minsa.gob.pe/Publicaciones/pubs/Tecnologias/03.htm>
- Monteiro, R., Alendouro, S., Figueiredo, F., Ferro, M., & Fernandez, M. (2006). Development and properties of a glass made from MSWI bottom ash. *J. Non Cryst. Solids* 352, 130-135.
- Moreno, J. (s.f.). *Universidad de Valencia*. Recuperado el 12 de Marzo de 2015, de El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. : http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/02t.pdf
- Morselli, L., Robertis, C., Luzi, J., & Passarini, F. &. (2008). Environmental impacts of waste incineration in regional system (Emilia Romagna, Italy) evaluated from a life cycle perspective. *Journal of hazardous materials*, 505-511.
- Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., & Haralambous, K. &. (2005). Desmostracion plasma gasification/vitrification system for efective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 120-126.
- Municipalidad de Senillosa. (2001). Plan Urbano Ambiental (PUA). Senillosa, Neuquén, Argentina.
- Münster, M., & Mebom, P. (2010). Optimization of use of waste in the future energy system. . *Energy* 36, 1251-1263.



- Murphy, J. &. (2004). Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*, 1043-1057.
- Ósorio, J., & Orjuela, J. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, vol XIV, 39, 247-252.
- Phonghiphat, A., Ryu, C., Finney, K., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2011). Ash deposit characterisation in a large-scale municipal waste to energy incineration plant. *Journal of Hazardous Materials*, 218-226.
- Pradip, K. (2004). Manufacture of eco-friendly and energy-efficient alinite cements from gly ashes and other bulk wastes. *R. Processing* 51, 8-13.
- Psomopoulos, C., & Bourka, A. &. (2009). Waste to energy: a review of the status and benefits in U.S.A. *Waste Management* 29, 1718-1724.
- Quaak, P., & Knoef, H. &. (1999). Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies. *The world bank technical paper N° 422.*, 78.
- Repsol YPF. (2007). Procedimientos del sistema de gestión. *Clasificación de residuos generados en las operaciones*. Argentina.
- Riber, C., Bhandar, G., & Christensen, T. (2008). Environmental assessment of waste incineration in a life cycle perspective. *Waste Manag.*, 96-108.
- Rogers, J., & Brammer, J. (2009). Analysis of transport costs for energy crops for use in biomass pyrolysis plant networks. *Biomass and Bioenergy*, 1367-1375.
- Rogers, J., & Brammer, J. (2012). Estimation of the production cost of fast pyrolysis bio-oil. *Biomass and Bioenergy*, 208-217.
- Roldan, A., & Aguelles, R. (2000). *Saneamiento de suelos contaminados mediante biopilas*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2012, de UNAM: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/029.pdf>.
- Ruiz, J. E. (2007). Caracterización ambiental de la industria petrolera: tecnologías disponibles para la prevención y mitigación de impactos ambientales. *Tesis*. Medellín, Colombia.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill.
- Saaty, T. (2001). *The seven pillars of the Analytic Hierarchy Process, Chapter 2*. Springer: Murat Köksalan and Stanley Zionts.



- Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O., Mostbauer, P., y otros. (2003). Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 61-88.
- Sawell, S., Hetherington, S., & Chandieu, A. (1996). An overview of municipal solid waste management . *Waste Management* 23, 61-88.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Dirección de residuos peligrosos*. . Recuperado el 10 de Julio de 2014, de Nómica de operadores de residuos industriales.: www2.medioambiente.gov.ar
- Secretaría de Estado de Energía y Minería. (2006). Plan de licitación para la exploración de hidrocarburos, Provincia del Neuquén.
- Secretaría de Industria y Comercio y PYME. Provincia del Neuquén. (2004). *Agencia de inversiones*. Obtenido de www.inversiones.gov.ar
- SEDESOL. (s.f.). *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. Recuperado el 12 de Mayo de 2013, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap5.pdf>
- Stanmore, B. (2004). The formation of dioxins in combustion systems. *Combust Flame* 136, 398-427.
- Swanson, R., Platon, A., & Satrio, J. &. (2010). Techno-economic analysis of biomass to liquids production base on gasification. *Fuel*, 1960-1972.
- Tang, J. (Septiembre de 2012). A cost-benefit analysis of waste incineration with advaced bottom ash separation technology for a Chinese Municipality. *Thesis master of science. Vienna school of international studies*. .
- Tavares, G., Zsigaiova, Z., & Semiao, V. (2011). Multicriteria GIS sitting of an incierator plant for municipal solid waste. *Waste Manag.*, 1960-1972.
- Toledo, J., & Corella, J. &. (2005). The partitionin of heavy metals in incineration of sludge and waste in a building fluized bed. 2. Interpretation of results with a conceptual model. *J. Hazard. Mater.*, 158-168.
- Toskano, G. (2005). El procesos de análisis jerarquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Lima, Perú.
- Universidad Pontificia de Comillas. (s.f.). *Universidad Pontificia de Comillas*. Recuperado el 05 de Junio de 2013, de <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4fc5e7a807b17.pdf>



- Urbano, D., Osorio, J., & Manyoma, P. (2012). Selección de sistemas de tratamiento de residuos sólidos residenciales a través de técnicas multicriterio. Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Van Caneghem, J., Brems, A., Lieves, P., Block, C., Bilén, P., Vermeulen, I., y otros. (2012). Fluidized bed waste incinerators; design, operational and environmental issues. . *Progress in Energy and Comb. Science*, 551-582.
- Vermeulen, I., Caneghem, J., Block, C., & Dewful, W. &. (2012). Environmental impact of incineration of calorific industrial waste: rotary kiln vs. cement kiln. *Waste management*, 1853-1863.
- Wang, Q., Yan, J., Tu, X., & Chi, Y. &. (2009). Thermal treatment of municipal solid waste incinerator fly ash using DC double arc argón plasma. . *Fuel*, 955-958.
- Westinghouse. (s.f.). Obtenido de Westinghouse Web site: <http://www.westinghouse-plasma.com/>
- Wiley J. & Sons, I. (2010). *Introduction to gasification/pyrolysis and combustion technology*. http://media.johnwiley.com.au/product_data/excerpt/74/04705396/0470539674.pdf
- Wright, M., Daugaard, D., & Satrio, J. &. (2010). Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. *Fuel*, S2-S10.
- Wu, C., & Williams, P. (2000). Pyrolysis gasification of post consumer municipal solid plastic waste for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 949-957.
- Xiao, R., Baosheng, J., Honchang, Z., Zhaoping, Z., & Mingyao, Z. (2007). Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. . *Energy Conversion and Management* 48, 778-786.
- Yang, L., Wang, H., & Wong, D. &. (2011). Solid waste plasma disposal plant. *Journal of electrostatics*, 411-413.
- Yassin, L., Lettieri, P., Simons, J., & Germana, A. (2009). Techno-economic performance of energy from waste fluidized bed combustin and gasification processes in the UK context. *Chemical Engineering Journal* 146, 315-327.
- Young, G. (Febrero de 2008). From waste solids to fuel . *Poluution Engineering*.



ANEXOS