



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE
TECNOLOGÍAS TÉRMICAS PARA EL
PROCESAMIENTO DE RESIDUOS
SÓLIDOS MUNICIPALES**

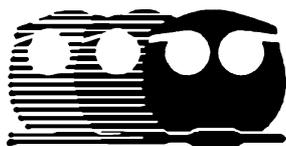
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

JOSÉ EFRAÍN TERÁN VARGAS



MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Dr. Reynaldo Sandoval González
Vocal: M. en C. Antonio Francisco Díaz García
Secretario: M. en C. Hugo Norberto Ciceri Silvenses
1er. Suplente: I. Q. Rodolfo Torres Barrera
2do. Suplente: Dr. Alfonso Durán Moreno

Sitio en donde se desarrollo el tema:

Edificio "D", cubículo 8.
Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
México, D. F.

Asesor del tema
M. en C. Hugo Norberto Ciceri Silvenses

Sustentante
José Efraín Terán Vargas

Agradecimientos.

Gracias a Dios.

A mis padres José Efraín Terán Porcayo y Rosa Maria Vargas Ovalle por el amor, confianza y comprensión que siempre me han dado, y por impulsarme a lograr mis objetivos.

A mis hermanos: Sergio Eduardo, Julio Enrique y David Antonio por alentarme a mi superación personal.

Gracias a todos los miembros del honorable jurado, Maestro Hugo Norberto Ciceri Silvenses, Maestro Antonio Díaz García y Dr. Reynaldo Sandoval, por su tiempo y sus aportaciones en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y compañeros por su amistad. A ti Fabiola por todos los momentos compartidos, así como por el amor, comprensión y tolerancia recibidos.

A todos mis profesores por transmitirme sus conocimientos y consejos que me guiarán en mi formación profesional.

Gracias Universidad Nacional Autónoma de México por forjarme como profesionista.

Efraín

Índice general

	Pág.
Glosario de términos	1
Lista de acrónimos y abreviaturas	3
Introducción	5
Objetivo	5
Capítulo 1. Marco teórico	6
1.1 Antecedentes	7
1.2 Alternativas tecnológicas para procesar RSM	8
1.3 Conceptos clave	10
1.3.1 El proceso de gasificación	11
1.3.2 Concepto de pirólisis	11
1.3.3 El proceso de incineración	12
1.4 Criterios preliminares para la selección de las tecnologías a estudiar	13
1.5 Conclusiones	13
Capítulo 2. Análisis de tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM	14
2.1 <i>Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC)</i> de SolenaGroup	15
2.1.1 Antecedentes <i>Solena Group</i>	16
2.1.2 Descripción de la tecnología PGV	16
2.1.2.1 Etapa de preparación de la materia prima	18
2.1.2.2 Etapa de reacción en reactor PGV	18
2.1.2.3 Etapa de limpieza del gas	21
2.1.2.4 Etapa de compresión y generación de energía eléctrica	23
2.1.2.5 Consideraciones para la producción de energía.	24
2.1.3 Capacidades de planta de gasificación de Solena Group	24
2.1.4 Desempeño ecológico	25
2.1.4.1 Consideraciones específicas de contaminantes (cenizas, NO _x , SO _x / Azufre)	25
2.1.4.2 Análisis de emisiones	28
2.1.5 Costos de procesamiento	30

2.1.6 Innovaciones de <i>Solena Group</i>	31
2.2 Tecnología <i>Direct Melting System (DMS)</i> de Nippon Steel	33
2.2.1 Antecedentes <i>Nippon Steel</i>	33
2.2.2 Localización de plantas con tecnología <i>Direct Melting System(DMS)</i>	34
2.2.3 Descripción del proceso <i>Direct Melting System(DMS)</i>	37
2.2.4 Descripción del las etapas del proceso de tratamiento de RSM	39
2.2.4.1 Etapa de reacción	39
2.2.4.2 Plantas PSA para producción de oxígeno	41
2.2.4.3 Cámara de combustión	43
2.2.4.4 Etapa de recuperación de energía	43
2.2.4.5 Etapa de separación	43
2.2.5 Tratamiento de los gases a la atmósfera	45
2.2.6. Balances de materia y energía en el proceso de <i>Nippon Steel</i>	45
2.2.7 Evolución tecnológica.	46
2.2.8 Innovaciones del proceso de tratamiento RSM con tecnología <i>Nippon Steel</i>	46
2.2.8.1 Innovaciones en el reactor de fusión	46
2.2.8.2 Innovación en la cámara de combustión	48
2.3 Proceso <i>Plasma Enhanced Melter (PET™)</i> de Integrated Environmental Technologies (IET)	49
2.3.1 Antecedentes <i>Integrated Environmental Technologies (IET)</i>	49
2.3.2 Descripción general del proceso PET™	49
2.3.2.1 Principios de la tecnología PET™	49
2.3.2.2 Diseño básico del sistema PET™	52
2.3.2.3 Sistema de alimentación	52
2.3.2.4 Reactor	53
2.3.2.5 Sistema de electrodos de corriente directa (CD)	53
2.3.2.6 Sistema de electrodos de corriente alterna (CA)	53
2.3.2.7 Sistema de control de contaminación de aire	54
2.3.2.8 Generador de energía	55

2.3.3 Capacidad de procesamiento PEM™	55
2.3.3.1 Diseño modular	58
2.3.3.2 Módulo opcional para el tratamiento de aguas residuales.	58
2.3.3.3 Requerimientos de energía	59
2.3.4 Características del sistema PET™	60
2.3.4.1 Eficiencia de energía y fiabilidad de electrodos.	60
2.3.4.2 Adaptabilidad y costos del proceso.	61
2.3.5 Efluentes del sistema y reciclaje de vidrio	61
2.3.5.1 Vidrio.	61
2.3.5.2 Filtro colector de polvos.	62
2.3.5.3 Soluciones provenientes de la depuración del gas	63
2.4 Tecnología <i>TwinRec</i> de Ebara	64
2.4.1 Antecedentes	64
2.4.1.1 De incineración a gasificación	65
2.4.2 Descripción del proceso <i>TwinRec</i>	65
2.4.3 Características del equipo de proceso	68
2.4.4 Desempeño ambiental	69
2.4.4.1 Emisiones del proceso	69
2.4.4.2 Resultados del reciclado y la recuperación	69
2.4.4.3 Reciclado del vidrio granulado	70
2.4.5 Experiencia de <i>Ebara</i>	71
2.5 Conclusiones	74
Capítulo 3. Bonos de carbono	76
3.1 Efecto Invernadero y consecuencias del calentamiento global	77
3.2 Respuesta al calentamiento global: El Protocolo de Kyoto	80
3.3 Los bonos de carbono	82
3.4 El mecanismo de desarrollo limpio (MDL)	84
3.4.1 Actores que intervienen en el proceso del MDL	86
3.4.2 Desarrollo de proyectos MDL	86
3.4.3 Ciclo de proyecto de un MDL	88
3.4.4 Proyectos MDL México	90

Índice

3.5 El mercado de los “bonos de carbono”	92
3.5.1 Evolución de los mercados	93
3.5.2 Tipos de transacciones	94
3.5.3 Participantes	94
3.5.4 Tamaño del mercado	96
3.6 Impacto de los bonos de carbono en un proyecto de inversión	97
3.7 Conclusiones	98
Capítulo 4. Selección de tecnología	100
4.1 Descripción de la metodología para selección de tecnología	101
4.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas.	103
4.3 Aspectos a considerar en la selección de tecnología	110
4.4 Metodologías de análisis multicriterio.	112
4.4.1 Metodología base para seleccionar la tecnología a utilizar	112
4.4.1.1 Ventajas y desventajas de la metodología base	114
4.4.2. Metodología <i>PROMETHEE & GAIA</i>	115
4.4.2.1 Definición del criterio generalizado	115
4.4.2.2 Construcción del índice de preferencia multicriterio	116
4.4.2.3 Adopción de la decisión final	116
4.4.2.4 Ventajas y desventajas de la metodología <i>PROMETHEE & GAIA</i>	117
4.5 Aplicación de las metodologías propuestas	118
4.5.1 Resolución mediante metodología base	119
4.5.2 Resolución con metodología <i>PROMETHEE & GAIA</i>	121
4.5.3 Análisis de sensibilidad	123
4.6 Comparación de resultados	127
4.7 Conclusiones	128
Capítulo 5. Conclusiones generales	131
Bibliografía	134
Anexos	140
Anexo I. Método <i>PROMETHEE</i>	141

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1.1. Categorías y alternativas para procesar RSM	8
Tabla 1.2 Tecnologías y licenciadores por categoría	9
Tabla 2.1 Análisis de emisiones	28
Tabla 2.2 Costos de procesamiento para IPGCC Y NGCC	30
Tabla 2.3 Costos referentes a distintos tipos de generación de energía	31
Tabla 2.4. Plantas de tratamiento de RSM con tecnología <i>Nippon Steel</i>	35
Tabla 2.5 Balance de masa simplificado del proceso <i>Nippon Steel</i>	45
Tabla 2.6 Características de material EGRIT™	62
Tabla 2.7 Plantas diversas con tecnología TwinRec de Ebara	73
Tabla 2.8 Cuadro comparativo de las tecnologías estudiadas	75
Tabla 3.1 Gases de efecto invernadero	78
Tabla 3.2. Proyectos MDL en México	91
Tabla 4.1 Cuadro comparativo de características de las tecnologías estudiadas	109
Tabla 4.2 Metodología para la construcción de la matriz multicriterio	113
Tabla 4.3 Escala de valores numéricos para los aspectos a evaluar	114
Tabla 4.4 Selección de aspectos o categorías así como factor de valoración o ponderación	119
Tabla 4.5 Evaluación de la matriz obtenida por las tecnologías térmicas seleccionadas	120
Tabla 4.6. Resultados obtenidos en <i>DecisionLab</i> para el escenario 1.	124
Tabla 4.7 Resultados obtenidos en <i>DecisionLab</i> para el escenario 2.	125
Tabla 4.8 Resultados obtenidos en <i>DecisionLab</i> para el escenario 3	127
Tabla 4.9 Resultados obtenidos con metodologías	128
Tabla 6.1 Tabla de evaluación	141
Tabla 6.2 Pesos de relativa importancia	144
Tabla 6.3 Funciones de preferencia	146

Índice de figuras

	Pág.
Figura 2.1 Diagrama de flujo representativo del proceso <i>IPGCC</i> por <i>Solena Group</i>	17
Figura 2.2 Balance de materia y energía en un proyecto genérico de <i>Solena Group</i>	29
Figura 2.3 Diagrama de bloques del proceso de tratamiento RSM con la tecnología <i>Nippon Steel</i> separado por etapas	38
Figura 2.4 Diagrama simplificado del proceso DMS de <i>Nippon Steel</i>	39
Figura 2.5 Efecto de la mejora en el reactor de fusión para reducir el consumo de materias primas auxiliares	42
Figura 2.6 Diagrama simplificado del diagrama de proceso del sistema PET™	51
Figura 2.7 Reactor de proceso PET™	52
Figura 2.8 Ejemplo de la modularidad de un sistema PET™ para aplicación de lodos aceitosos	59
Figura 2.9 Diagrama de flujo simplificado del proceso <i>TwinRec</i>	66
Figura 3.1 Gráfico de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre y la temperatura media global en los últimos 1000 años	79
Figura 3.2. Los grandes emisores de CO ₂ , (Miles de millones de toneladas)	82
Figura 3.3 Comprobación de registro de emisiones en un proyecto MDL	85
Figura 3.4 Tipo de proyectos en MDL	88
Figura 3.5 Ciclo del proyecto MDL	90
Figura 3.6 Volumen anual (millones de TCO ₂) comercializadas	92
Figura 3.7 Vendedores de bonos de carbono	94
Figura 3.8 Compradores de bonos de carbono	95
Figura 4.1 Metodología para la selección de la tecnología a utilizar	102
Figura 4.2. Cuadro de riesgos involucrados para evaluación de tecnologías.	110
Figura 4.3. Tipos de criterios generalizados.	116

Índice

Figura 4.4. Clasificación total PROMETHEE II	121
Figura 4.5. Perfiles de las tecnologías	123
Figura 4.6 Resultados obtenidos por PROMETHEE II en escenario 1	124
Figura 4.7 Resultados obtenidos con herramienta << <i>Pesos cambiantes</i> >> en escenario 2.	125
Figura 4.8 Clasificación total PROMETHEE II en escenario 2	126
Figura 4.9 Clasificación total PROMETHEE II en escenario 3	127
Figura 6.1. Relaciones de dominancia	142
Figura 6.2. Función de preferencia	145
Figura 6.3 Gráfico de índices de preferencias agregadas	149
Figura 6.4 Flujos de categorías de <i>PROMETHEE</i>	149
Figura 6.5 Relaciones de PROMETHEE I	150

Glosario de términos

RSM (Residuos sólidos municipales)

Se denomina así a todos aquellos compuestos por numerosos desechos de tipo urbano, artículos de plástico, papel, cartón, cables, polietileno, vidrio, botellas, metales, etc. Por lo tanto en su composición hay numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos que se originan en la actividad doméstica de las ciudades.

Lixiviados

Se define como aquel líquido producido cuando el agua percola a través de cualquier material permeable. Es más comúnmente hallado asociado a rellenos sanitarios, en donde, como resultado de las lluvias se pueden formar productos de descomposición.

Gasificación

Se define como un proceso con reacciones termoquímicas, que convierte a un combustible sólido (biomasa, coque, carbón mineral), en un gas de alto valor energético partiendo de un agente gasificador, normalmente oxígeno, aire o vapor de agua. El proceso térmico se produce en una cámara de residuos sólidos donde se calienta a temperaturas entre los 800 a 1,800 °C, dependiendo de las características de la materia prima.

Pirólisis

Se define como la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo.

Incineración

Se define como el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química en exceso de oxígeno. La incineración utiliza altas temperaturas que oscilan entre 950°C y 1,200 °C, un a [atmósfera oxidante](#) y en ocasiones agitación para destruir los residuos.

Plasma térmico

Es aquél que tiene una alta densidad electrónica (10^{22} a 10^{11} partículas/m³) y baja energía de los electrones. Este plasma se puede producir mediante arcos eléctricos, antorchas de plasma y descargas de radio frecuencia. Se aplica para calentar, fundir y, en algunos casos, para lograr la síntesis de nuevos materiales.

Char

Se denomina así a un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activado (son productos sólidos de una pirólisis).

Gas pobre

El gas combustible o gas pobre es una mezcla de monóxido de carbono y nitrógeno. Se obtiene por oxidación parcial de carbón puro utilizando aire seco, tiene una composición de 34,7% de CO y 65% N₂

Dioxinas

Son compuestos químicos obtenidos a partir de procesos de combustión que implican al cloro. El término se aplica indistintamente a las policlorodibenzofuranos (PCDF) y las policlorodibenzodioxinas (PCDD).

Furanos

Son un grupo de 135 compuestos de estructura y efectos similares a las dioxinas y cuyas fuentes de generación son la misma. Se considera que estos compuestos son los contaminantes principales de los policlorobifenilos (PCB). Cuando se hace referencia a las dioxinas y compuestos similares en los textos se incluye también a los furanos y PCB.

Lista de acrónimos y abreviaturas

RSM: Residuos sólidos municipales

IPGCC: Integrated Plasma Gasification Combine Cycle

NGCC: Natural Gas Combine Cycle

PGV: Plasma Gasification and Vitrification

PSA: Pressure Swing Adsorption

CD: Corriente directa

CA: Corriente alterna

HEPA: High Efficiency Particulate Air

RTA: Residuos triturados de automóvil

CCA: Control de contaminación atmosférica

ASMBP: Agencia Suiza para el Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje

GEI: Gases de efecto invernadero

CFC: Compuestos fluorocarbonados

CERs: Certified Emission Reduction

AAU: Assigned Amount Units

ERU: Emission Reduction Unit

RMU. A Removal Unit

MDL: Mecanismo de desarrollo limpio

COMEGEI: Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y

Captura de Gases de Efecto Invernadero

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

PDD: Project Design Document

EOD: Entidad operacional designada

SENER: Secretaría de Energía

PCF: Prototype Carbon Found

PD: Países desarrollados

PED: Países en vías de desarrollo

PROMETHEE: Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations

GAIA: Geometrical Analysis for Interactive Assistance

Introducción

Esta tesis tiene como finalidad analizar y comparar algunas tecnologías térmicas cuya función es el tratamiento de residuos sólidos municipales que puedan ser aplicadas en México.

El análisis estará enfocado a aquéllos aspectos que puedan ser tomados en cuenta con el fin de decidir sobre que alternativa tecnológica pueda ser la más adecuada para resolver la problemática relacionada con la administración y eliminación de los residuos sólidos municipales.

Los principales temas abordados son:

Una breve descripción de las tecnologías térmicas que existen para el tratamiento de RSM y de los fundamentos y procesos involucrados en cada una de estas tecnologías. Luego se realizará el análisis de estas tecnologías térmicas para el tratamiento de los RSM. Estudiándose por separado los aspectos más relevantes de cada tecnología y se mencionarán ventajas y desventajas de cada una de éstas, las cuales nos permitirán compararlas y tomar decisiones al respecto para finalmente concluir y establecer las recomendaciones pertinentes. Adicionalmente a estos aspectos a tratar, se tocará el tema referente a bonos de carbono, el cual ha adquirido una gran importancia en la actualidad.

Objetivo

De un grupo de alternativas tecnológicas se hará una selección cuidadosa de ciertos procesos térmicos utilizados para el procesamiento de residuos sólidos municipales para ser estudiados y analizados por separado con la finalidad de poder hacer una comparación entre éstas y así valorar sus ventajas y desventajas.

Capítulo 1
Marco de referencia

1.1 Antecedentes

Actualmente es uno de los retos más importantes que enfrentan nuestras ciudades es la disposición y el manejo adecuado de los RSM¹ (Residuos sólidos municipales).

Es importante disponer adecuadamente de estos residuos por las siguientes razones:

- Los residuos sólidos municipales manejados incorrectamente provocan la proliferación de enfermedades y la contaminación del agua y del aire.
- El TLCAN y los acuerdos ambientales han atraído la atención hacia las necesidades ambientales de México.
- La cantidad de residuos sólidos en México continúa creciendo.
- Existen muy pocas instalaciones de rellenos sanitarios que pueden recibir, tratar y eliminar adecuadamente los residuos sólidos.

Para tener una perspectiva del problema se hace notar que en el año 2006 se generaron en la República Mexicana cerca de 36,135 miles de toneladas y considerando las fuentes de los residuos sólidos municipales por área geográfica, 4599 miles de toneladas provienen sólo de la Ciudad de México. La generación de RSM en promedio por persona en la Cd. de México era de 1.43 kg en el 2006, mientras que en la región Sur de la República Mexicana era de 0.7 kg². Por otra parte, cerca del 50% de los RSM se componen de una combinación de residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares.

Para el manejo y tratamiento de los RSM se están usando tecnologías que ya están dejando de ser funcionales, como es el caso de los rellenos sanitarios y los incineradores. El problema de los rellenos sanitarios es que se están saturando y la disponibilidad de nuevos sitios en ciudades pobladas es limitada. Además,

¹ Los RSM están compuestos por numerosos desechos de tipo urbano, artículos de plástico, papel, cartón, cables, polietileno, vidrio, botellas, metales, etc. Por lo tanto en su composición hay numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos que se originan en la actividad doméstica de las ciudades. Los compuestos orgánicos responden a la fórmula general $C_{10}H_{10}O_4$. Cuando la combustión ocurre en presencia de oxígeno, cada mol de $C_{10}H_{10}O_4$ genera 6 moles de CO_2 . Además muchos de los subproductos de la combustión son nocivos (SO_2 , HCl, dioxinas, Compuestos volátiles, Partículas suspendidas, etc). Fuente: Ciceri, Hugo Norberto, 2006.

² Fuente: INEGI, con base en SEDESOL, 2006,

aunado a esto, muchos rellenos están siendo clausurados por no cumplir con la normatividad ambiental por ejemplo en lo referente a los lixiviados³. Para el caso de los incineradores, el problema radica en que generan emisiones que contaminan el medio ambiente y algunas de estas sustancias son cancerígenas como es el caso de las dioxinas y furanos. Por esta razón, este proyecto dará a conocer nuevas alternativas tecnológicas para el tratamiento de RSM y recuperación de energía como son la gasificación por tipo convencional o por plasma, los cuales pueden ser adaptables a sitios como la Cd. de México. Además, una ventaja importante es la generación de fuentes renovables de combustible y de energía eléctrica a partir de los RSM.

1.1.1 Alternativas tecnológicas para procesar RSM.

La tabla No. 1.1 da cuenta de las principales rutas tecnológicas que podrían utilizarse como alternativas para procesar RSM, en ella se destacan 13 opciones tecnológicas agrupadas en dos categorías mediante las cuales se pueden tratar los RSM. En la categoría de las tecnologías térmicas se encuentran las correspondientes a gasificación convencional y la de gasificación por arco de plasma que son los objetos de este estudio.

Tabla No. 1.1 Categorías y alternativas para procesar RSM

Tecnologías térmicas	Reciclo térmico avanzado Pirólisis Pirólisis/gasificación Pirólisis/ con corriente de vapor Gasificación convencional/ lecho fluidizado Gasificación convencional/ lecho fijo Gasificación por arco de plasma
Tecnologías/Biológicas y Químicas	Digestión anaeróbica Digestión anaeróbica/composta Etanol fermentación Gas de síntesis a etanol Biodiesel Cracking catalítico

Fuente: Ciceri, Hugo Norberto, 2006.

³ Lixiviados: El lixiviado es el líquido producido cuando el agua percola a través de cualquier material permeable. Puede contener tanto materia en suspensión como disuelta, generalmente se da en ambos casos. Este líquido es más comúnmente hallado asociado a rellenos sanitarios, en donde, como resultado de las **lluvias** percolando a través de los desechos sólidos y reaccionando con los productos de descomposición, químicos, y otros compuestos, es producido el lixiviado. Fuente: Lystbaek Christian et. al, *Municipal solid waste treatment in the EU*, Arhus Univerity, Environmental Studies, 2004.

La tabla 1.2 da cuenta de 25 tecnologías con sus respectivos licenciadores, todas procesan RSM y desechos industriales y obtienen energía y gas de síntesis como productos principales. Sus escalas de procesamiento varían entre las 100,000 ton/año a las 3000,000 ton/ año.

Tabla 1.2. Tecnologías y licenciadores por categoría

Clasificación	Tecnología	Licenciador
Biológica	Aeróbica composta	Wright Enviromental Management Inc
Biológica	Aeróbica composta	American Bio-Tech
Biológica	Aeróbica composta	Horstmann Recyclingtechnik GmbH
Biológica	Anaeróbica digestión	Canada Composting, Inc. (CCI)
Biológica	Anaeróbica digestión	Valorga S.A.S
Biológica	Anaeróbica digestión	Organic Waste System N.V. (OWS)
Biológica	Anaeróbica digestión	ISKA GMBH
Biológica	Anaeróbica digestión	Arrow Ecology Ltd. (Arrow)
Biológica	Anaeróbica digestión	Citec
Biológica	Anaeróbica digestión	Global Renewables/ISKA
Térmicas	Térmicas	Changing World Technologies
Térmicas	Gasificación	Primenergy (RRA)
Térmicas	Gasificación	Omnifuel/Downstren Systems (Omni)
Térmicas	Gasificación	Whitten Group/Entech Renewable Energy System
Térmicas	Gasificación	Energy Products Idaho
Térmicas	Gasificación	Ebara
Térmicas	Sistemas de reciclo térmico avanzado	Consutech Systems LLC
Térmicas	Sistemas de reciclo térmico avanzado	Seghers Keppel Technology, Inc.
Térmicas	Sistemas de reciclo térmico avanzado	Waste Recovery Seattle, Inc.
Térmicas	Sistemas de reciclo térmico avanzado	Basic Envirotech Inc.
Térmicas	Sistemas de reciclo térmico avanzado	Covanta Energy Corp.
Térmicas	Pirólisis/reformado vapor	Brighstar Enviromental
Térmicas	Pirólisis	WasteGen Ltd/ Tech Trade
Térmicas	Pirólisis	Taylor Recycling Facility
Térmicas	Pirólisis/gasificación	Interstate Waste Technologies/Termoselect

Fuente: Ciceri, Hugo Norberto, 2006.

Su eficiencia térmica varía entre los 250-700 kWh/ton dependiendo del tipo de alimentación, el poder calorífico de la misma y la opción tecnológica seleccionada; finalmente el costo de capital que es función de la tecnología, de las consideraciones del diseño y del tamaño de la planta se encuentra en un rango de

270 a 600 (dólares/Ton)⁴. En la mayoría de los casos los datos corresponden a tecnologías probadas.

Otro dato importante es el volumen y la naturaleza de los residuos post-proceso, ellos dependen de la tecnología y la composición de la alimentación; por ejemplo la tecnología utilizada por Ebara, que procesa 100,000 Ton/h de RSM. Tiene dos residuos principales: slag 11,300 Ton/h y 1,230 Ton/h metales que deben ser manejados posteriormente y su eficiencia es de 670 kW/ton.

1.2 Conceptos clave.

Antes de llevar a cabo el estudio de las tecnologías térmicas seleccionadas es necesario tomar en cuenta algunos conceptos clave que nos facilitarán el entendimiento de las mismas y los cuales serán presentados a continuación:

1.2.1 El proceso de gasificación.

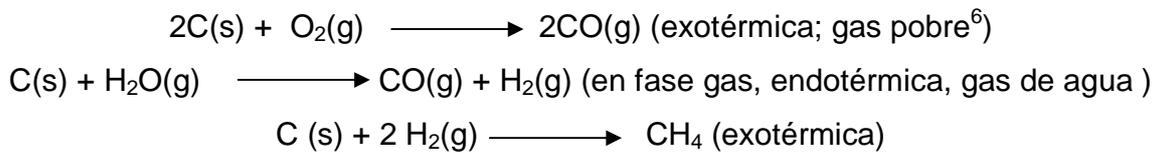
La gasificación se define como un proceso térmico que permite la conversión del residuo sólido en un gas de alto valor energético por medio de la adición de gases reactivos (un agente gasificador), generalmente oxígeno, aire y / o vapor de agua, mediante un proceso de oxidación parcial. El proceso térmico se produce en una cámara de residuos sólidos (reactor de fusión), donde se calienta a temperaturas que se encuentran entre los 800 a 1800 °C, dependiendo de las características de la materia prima.

A diferencia de la incineración, la gasificación es un proceso que ocurre en un ambiente con oxígeno controlado y dar lugar a una reacción química diferente⁵. El proceso de gasificación consta de tres etapas básicas: el secado, la pirólisis y la gasificación.

⁴ Todos los datos exhibidos son preliminares.

⁵ Hill A. et al., *Solid waste management alternatives for the city of New York*, Columbia University, Workshop Report, 2005.

Las principales reacciones del proceso de gasificación son:



Los subproductos del proceso de gasificación son:

- Gas combustible: un gas combustible limpio, que puede ser filtrado para eliminar las impurezas, éste gas suele utilizarse para generar electricidad. Parte de este gas también se utiliza para alimentar el proceso térmico.
- Sólidos (escoria): un subproducto que puede incluir también un flujo de líquido, con potencial uso en la industria de la construcción.

En estos procesos, los residuos mezclados son alimentados en la gasificación o plasma donde tiene lugar la reacción. La materia prima puede mezclarse con materiales combustibles como el coque de petróleo o para aumentar la temperatura de la cámara de gasificación.

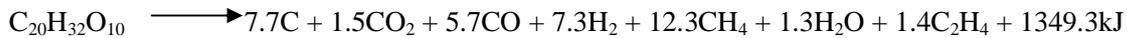
1.2.2 Concepto de pirólisis

La pirólisis se define como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno, generándose cantidades variables de gases (gas de síntesis), líquidos (alquitranes y aceites) y residuos carbonosos o “char”⁷. Esta descomposición se produce a través de una serie de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor, el rango de temperatura empleado oscila entre 150 y 900°C.

⁶ Gas pobre, el gas combustible o gas pobre es una mezcla de monóxido de carbono y nitrógeno. Se obtiene por oxidación parcial de carbón puro utilizando aire seco, tiene una composición de 34,7% CO y 65% N₂.

⁷ “char”: es un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo (son productos sólidos de una pirólisis).

Se pueden representar las reacciones que ocurren con la siguiente ecuación:



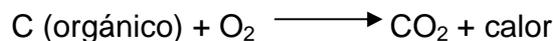
La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión. A partir de la pirólisis pueden obtenerse diferentes productos secundarios útiles en función de la tecnología de tratamiento que se utilice⁸.

1.2.3 El proceso de incineración.

La incineración es el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química en exceso de oxígeno. La incineración utiliza altas temperaturas que oscilan entre 950°C y 1,200°C., una atmósfera oxidante y en ocasiones agitación para destruir los residuos. Este proceso es utilizado para tratamiento de residuos sólidos urbanos, residuos industriales peligrosos y residuos hospitalarios. Los productos finales son básicamente gases de combustión entre los que predominan las dioxinas y furanos, efluentes líquidos y cenizas (residuos no combustibles)⁹.

Bajo condiciones ideales, usando sólo la cantidad estequiométrica de O₂ y que éste reaccione únicamente en su estado elemental, los productos gaseosos derivados de la incineración de residuos estarían constituidos por CO₂, H₂O, N₂ y SO₂ en menor cantidad.

Las reacciones de combustión (oxidación) que se producirán entre el carbono, el hidrógeno y el azufre contenidos en los residuos y el oxígeno del aire, serían básicamente las siguientes:



⁸ Grasi, G., "Pyrolysis and gasification of biomass", in: *Pyrolysis and Gasification*, Conference International, Luxemburgo, p. 7, 1989.

⁹ Lystbaek Christian et. al, *Municipal solid waste treatment in the EU*, Aarhus University, Environmental Studies, 2004

1.3 Criterios preliminares para la selección de las tecnologías a estudiar.

Los criterios iniciales que se considerarán para hacer una selección de las tecnologías térmicas a estudiar son:

- Experiencia demostrada
- Confiabilidad del proceso
- Emisión de gases tóxicos
- Escalamientos de diseño
- Eficiencia en recuperación de energía

1.4 Conclusiones

Ante el problema presentado en materia ambiental en los centros urbanos como la ciudad de México para un adecuado tratamiento de residuos sólidos municipales, es necesario tomar medidas eficaces que nos conlleven en cierta parte a una disminución considerable de este tipo de residuos. Por eso en esta investigación se estarán tomando en cuenta nuevas alternativas tecnológicas de tipo térmico ya que han demostrado tener confiabilidad y experiencia en sus procesos.

Para realizar el estudio comparativo de estas tecnologías, es necesario limitar nuestra área de estudio ya que existe una amplia gama de tecnologías térmicas. Para esto fue necesario tomar en cuenta criterios preliminares para la selección de cuatro tecnologías térmicas que posteriormente se analizarán con mayor detalle más adelante.

Es importante plantear las bases teóricas para el desarrollo de cualquier investigación ya que nos permite desde plantear los antecedentes, hasta la respuesta a la necesidad que se pretende, por lo que tener un marco de referencia nos permitirá llegar a una adecuada resolución de nuestro objetivo.

Capítulo 2
Análisis de tecnologías térmicas seleccionadas para el
procesamiento de RSM

El propósito de este capítulo es la descripción y el análisis por separado de cada una de las tecnologías térmicas que han sido seleccionadas en donde se destacarán los aspectos más relevantes de cada una de éstas y que a su vez serán utilizados como guía en el estudio comparativo que se realizará más adelante.

Las tecnologías térmicas que serán descritas a continuación con sus respectivos licenciadores son:

- *Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC)* de Solena Group
- *Direct Melting System (DMS)* de Nippon Steel
- *Plasma Enhance Melter (PETTM)* de Integrated Environmental Technologies(IET)
- *TwinRec* de Ebara Corporation

2.1 *Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC)* de Solena Group

2.1.1 Antecedentes de Solena Group

Solena Group es una compañía de EE.UU. enfocada a la producción de energía renovable con sede en Washington, DC, y que tiene distintas oficinas distribuidas en lugares estratégicos del mundo, como en España. A través de Acciona SA, una de las mayores empresas de energía renovable en Europa, como su principal socio estratégico y accionista, *Solena Group* desarrolla, construye y opera las instalaciones de producción de energía en todo el mundo utilizando el proceso patentado denominado *Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCCTM)*. Este proceso cumple con los requisitos planteados en el programa de trabajo de EE.UU “Desarrollo Sustentable de Energía y Medio Ambiente”, así como los objetivos establecidos en el Protocolo de Kyoto y también en el documento “Energía para el Futuro”.

La tecnología IPGCC tiene sus orígenes en programas de simulación llevados a cabo en la NASA y que fueron probados en los escudos de las naves espaciales que eran enviadas al espacio en los años 1960. Solena ha recibido aprobaciones

en cuanto se refiere a su tercera patente titulada “Plasma Pyrolysis Gasification and Vitrification of Organic Material” por el organismo Patent Cooperative Treaty (PCT) con patentes provenientes de EE.UU. (No.6987792) y la (No. EP 1 419 220 B1), pero que inclusive con patentes en Francia, España, Alemania, Italia Dinamarca, Suecia, Holanda, Irlanda, Inglaterra, Polonia, República Checa, Malasia y Hungría y hasta de 197 países¹.

2.1.2 Descripción de la tecnología PGV

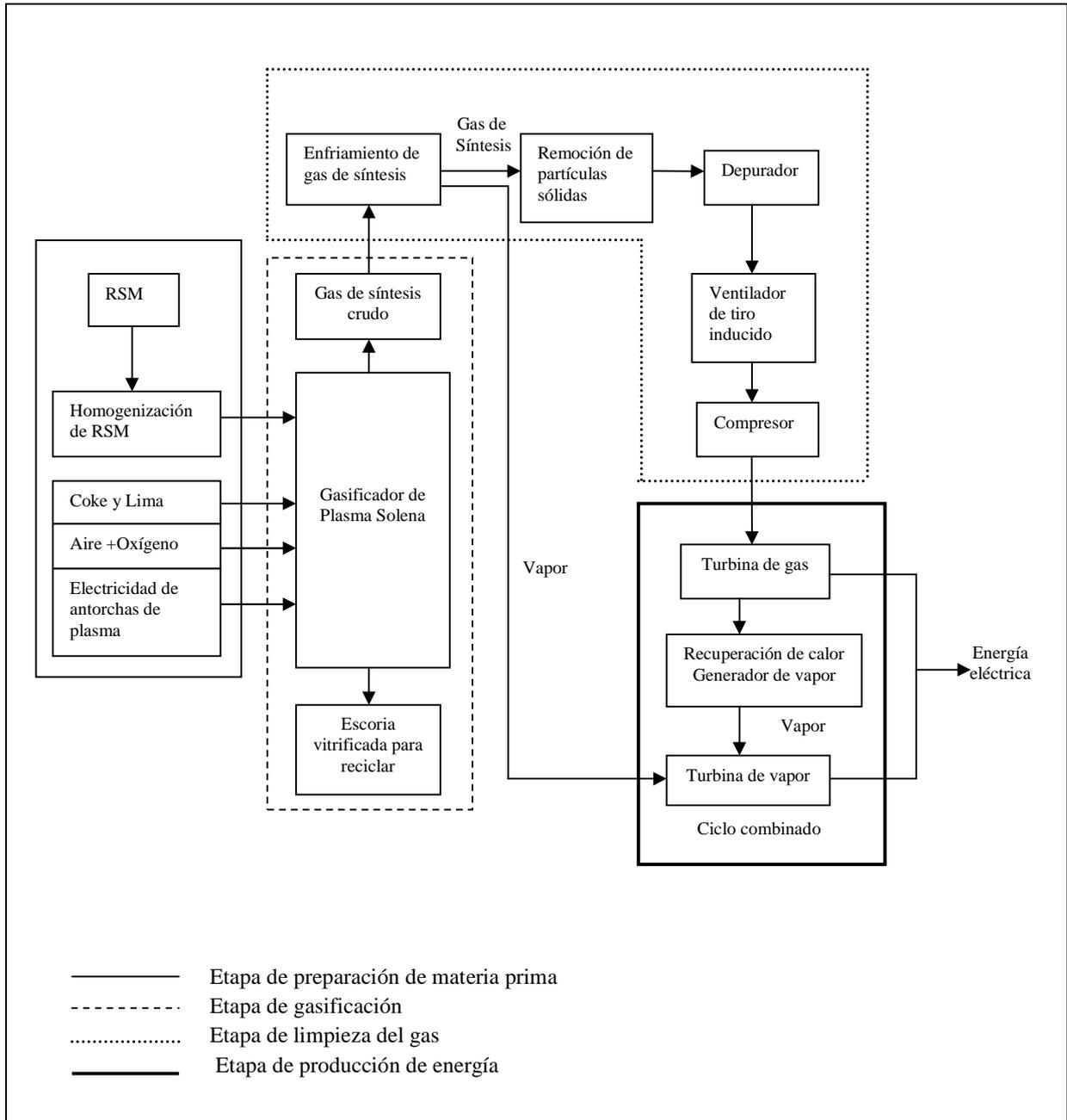
Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC) es un proceso que utiliza la tecnología Plasma Gasification Vitrification (PGV) para la conversión de RSM en un gas de síntesis que contiene en gran parte monóxido de carbono y gases de hidrógeno, el cual posee un valor calorífico determinado. Este gas es empleado como combustible primario para las turbina de gas.

El proceso *IPGCC* el cual es mostrado en la figura 2.1, consiste generalmente en cuatro etapas fundamentales:

- Etapa de preparación de la materia prima.
- Etapa de reacción en reactor PGV
- Etapa de limpieza del gas.
- Etapa de compresión y generación de electricidad.

¹ <http://www.solenagroup.com>. Consultada el día 27 de junio de 2008(página principal).

Fig. 2.1. Diagrama de flujo representativo del proceso IPGCC por Solena Group



Fuente: Elaboración propia a partir de Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008

A continuación se presentarán por separado cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

2.1.2.1 Etapa de preparación de la materia prima

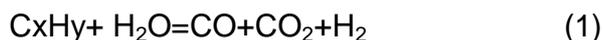
El sistema de alimentación es flexible ya que se le puede proveer distintas fuentes de desechos como son los residuos sólidos municipales o desechos industriales, tóxicos y peligrosos. Los desechos son tomados en su forma original y alimentados directamente al sistema sin tener que hacer una selección y remoción de sus contenedores. Para esto cuentan con sistemas automáticos que se encargan de triturar, desmenuzar, mezclar, compactar y empujar los desechos que tendrán forma de bloque al entrar al reactor de plasma.

Los bloques de desechos son alimentados continuamente a través de distintas zonas del reactor (comúnmente son dos entradas opuestas con respecto al diámetro del reactor) para asegurar su buena distribución hasta que se forme una altura de lecho determinada de desechos por encima de la altura de lecho del catalizador a base de carbón activado. Existen sensores de presión y temperatura lo largo del reactor para medir la altura del lecho y controlar el flujo de alimentación los desechos.

Para diferentes materiales pueden ser usadas varias configuraciones en el sistema de alimentación. Por ejemplo, para desechos que sean polvos finos o líquidos pueden ser introducidos directamente al reactor. El gas es usado para transportar sólidos finos, como los trozos de carbón finos. Para el caso de los líquidos, deberán ser usadas bombas.

2.1.2.2 Etapa de reacción en reactor PGV.

Conforme van descendiendo los desechos al reactor y el ascenso de los gases calientes la porción orgánica de los desechos será pirolizada/gasificada en un ambiente parcialmente reductor. El cambio se puede representar con la siguiente reacción:



Donde C_xH_y representa un hidrocarburo arbitrario, y el H_2O es el vapor recirculado.

Aunque la “gasificación por medio del vapor”, descrita en la reacción anterior es la que constituye en mayor proporción dentro del proceso por plasma por pirólisis/

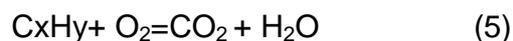
gasificación y vitrificación, se ha encontrado que la energía consumida es demasiado alta. Por lo que se han hecho modificaciones al proceso para tratar de disminuir el consumo de energía requerido por las antorchas e incrementar la energía producida. Para esto, se introduce una controlada cantidad de aire enriquecido con oxígeno dentro de distintos puntos del reactor en el cual se dan las siguientes reacciones:



Las reacciones (2) y (3) son exotérmicas y la (1) y (4) son endotérmicas en naturaleza, permitiendo así que la energía inherente de los residuos a través de esta reacción oxidativa controlada pueda aumentar el valor calorífico de la salida de gas a través de la generación de más CO y H₂; así se pueda reducir el consumo requerido por la antorcha de plasma para llevar a cabo las reacciones (1) y (4).

La reacción en la fórmula (1) se seguirá produciendo en el reactor por el agua que normalmente se encuentran en la alimentación de residuos. La molécula del agua será rota, como consecuencia del aumento de gas caliente a través del lecho formado por desechos dando H₂ y O₂. Estos se combinan con la molécula de C libre de los desechos y con el catalizador de carbono para formar el muy estable y deseado H₂ y CO.

El control de entrada de O₂ y aire enriquecido con O₂ introducido en el reactor debe ser suficiente para generar las reacciones de oxidación (2) y (3) anteriores, y a su vez para crear la combustión completa a través de la reacción oxidativa, la cual se produce a una mucho más baja temperatura.



La introducción controlada de oxígeno y aire enriquecido con oxígeno en el reactor de plasma para generar un control de la reacción de oxidación parcial de la

gasificación generará un gas de síntesis con un mayor contenido calorífico y se disminuirá la energía consumida por las antorchas de plasma para gasificar los residuos. Esto, a su vez se traduce en una mayor producción neta de energía a partir de la gasificación de residuos. Por las temperaturas presentes en el reactor en la presencia de carbono sólido, el cual proviene del lecho del catalizador, propicia que la siguiente reacción (6) genere mayor cantidad de CO:



El control del proceso de gasificación por medio del oxígeno, el aire y la humedad inherente de los residuos puede producir un gas de síntesis con un valor mínimo de poder calorífico de 3600 kJ / kg (una composición de gas que contiene al menos 40-45% de H₂ y 40-45 % CO). (El resto de componentes de los gases son generalmente las emisiones de CO₂, CH₄, N₂, y trazas de gases ácidos, dependiendo de la composición material de alimentación).

Como se ha señalado anteriormente, del proceso se obtiene en gran parte el gas de síntesis, quedando el resto de material inorgánico fundido, que se enfría formando una escoria vitrificada inerte.

El lecho formado por residuos se consume continuamente por el aumento de los gases caliente y que es repuesto continuamente por el sistema de alimentación con el fin de mantener la altura de la cama. (Catalizador de carbono es también adicionado periódicamente a través de la alimentación, cuando hay necesidad de reposición.). Como resultado de esta secuencia se da un perfil de temperatura de hasta 4000-5000 °C y en la parte inferior del reactor a unos 1200 °C. en la salida del gas. El incremento del sistema contracorriente establecido, sirve para secar la entrada de desechos y, por tanto, permitir que el sistema pueda manejar una corriente de desechos con contenido de humedad de hasta un 90%, sin tener un aumento proporcional en las necesidades de consumo de energía. El reactor funciona a un nivel ligeramente inferior a la presión atmosférica, y la salida de gases se extrae constantemente fuera del reactor por inducción de un ventilador situado entre el sistema depurador de gas de síntesis y un compresor.

Las variables independientes del control del proceso son: (1) la velocidad de alimentación de los desechos, (2) altura del lecho del catalizador a base de carbono, (3) potencia de la antorcha (4), flujo de gas de el aire / O₂, y (5) el flujo de entrada (para controlar el proceso de escoria).

Como sabemos también se obtiene como producto un fundido de los desechos inorgánicos, el cual es alojado en la parte inferior del reactor y es retirado de forma continua. Es enviada la escoria a un embudo revestido de material refractario, el cual está conectado a un lugar cerrado lleno de agua. La masa fundida se enfría y solidifica en gránulos vidriosos, que se transportan por la cadena transportadora de arrastre. El vapor producido cuando la escoria está caliente, puede ser aprovechado para que se lleve a cabo la reacción de gasificación de vapor en el reactor. Por otra parte, la escoria puede ser sacada en grandes bloques a fin de maximizar la reducción de volumen.

Para asegurarse de que el flujo de la escoria es uniformemente constante se monitorea la temperatura y la viscosidad de la escoria en la parte inferior del reactor, las cuales pueden ser independientes, la cual es controlada por la corriente en la antorcha de plasma y la cantidad de flujo (CaO + Silicato) añadido a través de los sistemas de alimentación respectivamente. El flujo del material fundido también es supervisado de cerca por un medidor de flujo situado en la parte inferior del reactor.

Si existen variaciones en la alimentación de desechos afectarán las condiciones de salida del proceso y requerirán ajuste las variables de control independientes. Si se asume una velocidad de alimentación constante y un alto contenido de humedad en la alimentación dará como resultado un gas de síntesis con una temperatura más baja.

2.1.2.3 Etapa de limpieza del gas

Como se mencionó anteriormente, un objetivo para el funcionamiento del sistema del reactor PGV es producir un gas combustible con condiciones específicas (es decir, la composición, valor calorífico, la pureza y presión) adecuadas para la

alimentación en una turbina de gas para la producción de fuentes renovables de energía eléctrica.

Debido a que el combustible se genera por la pirólisis / gasificación de residuos orgánicos, hay determinadas cantidades de impurezas, partículas y / o gases ácidos que no son adecuados para el normal y seguro funcionamiento de las turbinas de gas. Un procedimiento simplificado para limpiar la salida de gas se describirá a continuación:

El gas de síntesis del reactor de plasma por primera vez es enfriado por la evaporación directa del agua en un evaporador. Esto es simple, fiable y rentable. En caso de que existan partículas de polvo que escapan del reactor, serán removidas del gas por un filtro electroestático, que se conoce como un eficiente y confiable equipo para separar el polvo. Se pueden incorporar otros equipos alternativos para la eliminación de partículas, tales como un depurador vénturi o un filtro de tipo "bolsa". El polvo es recogido y puede ser enviado de vuelta al reactor de plasma, ya que además se generan residuos sólidos en el sistema de limpieza del gas. Por otra parte, un recipiente recolectará la escoria, siendo que está revestido de acero con material refractario que alberga también el arco de plasma no transferido proveniente de la antorcha, que se puede utilizar para vitrificar los sólidos provenientes del depurador de gases en escorias no-lixiviables. En algunos casos, dependiendo de la planta y de la normativa local existente, los sólidos obtenidos del sistema de limpieza del gas pueden ser desechados de forma segura.

El gas de síntesis luego se trata en dos etapas: en primer lugar, los componentes como el cloro se eliminan en un depurador de contacto gas / líquido de alta eficiencia. El líquido usado para la limpieza de gas como la sosa se recicla de regreso a la primera sección de enfriamiento: una vez más, los residuos no se producen en este paso, y el consumo de agua se limita al mínimo posible.

Para los desechos que contienen una alta cantidad de azufre, nos puede producir un gas de síntesis de alto contenido de azufre. Por lo anterior, una segunda fase de limpieza del gas será requerida a través de otro líquido de lavado para eliminar compuestos de azufre. Azufre elemental es el único residuo recuperado del

proceso, el cual puede ser usado para su comercialización. El líquido usado para la limpieza se recicla de vuelta al proceso después de la regeneración, en donde no se producen desechos líquidos producidos durante este paso. Después de ser tratado el gas de síntesis puede ser enviado al compresor / turbina.

2.2.1.4 Etapa de compresión y generación de energía eléctrica.

El gas de síntesis producido a partir de los desechos será usado como combustible convencional para el ciclo combinado de energía. Sin embargo, el sistema de energía debe iniciarse con el gas natural y, a continuación, cambiar al gas de síntesis. El combustible debe ser alimentado a presión a la turbina de gas en la planta de ciclo combinado.

El gas de síntesis es comprimido a cerca de 36 bar y luego es calentado. El gas de síntesis es enfriado entre las etapas del compresor y después de la etapa final, el resto del agua en el gas es condensada, lo que nos da un valor calorífico del gas más alto. El agua condensada se recoge en un separador de humedad y reciclado para su uso en la planta de gasificación. Después de la última etapa, la refrigeración se logra parcialmente en un recuperador, que transfiere el calor húmedo del gas síntesis al del gas de síntesis seco. El enfriamiento final se realiza en un intercambiador de calor.

El recuperador se utiliza debido a que el calor adicional sensible en el gas de síntesis mejora la eficiencia del ciclo combinado planta de energía, y reduce al mínimo el agua de refrigeración del sistema de carga. Es necesario mantener el gas caliente por encima del punto de saturación a fin de garantizar la correcta operación de la turbina.

Antes de entrar en la turbina, el gas de síntesis que está seco y presurizado se filtra para recoger cualquier rastro de partículas que pueden haber sido recogidos en el equipo de procesamiento y en las tuberías.

El gas natural de la tubería es impulsado a presión de 34 bares utilizando un compresor de pistón. El gas natural fluye entonces a través de un filtro estándar / separador para eliminar cualquier rastro de gotas de agua o sólidos antes de ser enviado a la turbina de gas.

El ciclo combinado de turbina de gas produce electricidad a partir del gas generado por el reactor de plasma. Aproximadamente el 25% de la electricidad generada será utilizada por los equipos, tales como antorchas de plasma, reactor de plasma, el compresor, y equipo diverso, tales como bombas, y, por tanto, para proporcionar una autosuficiencia del sistema.

2.2.1.5 Consideraciones para la producción de energía.

La recuperación de calor es la suma del contenido de calor de los desechos, la energía térmica contenido en el catalizador de carbono, el O₂ y aire introducido en el sistema, el calor suministrado por el plasma, menos la pérdida de calor del reactor.

Además, en cuanto a las etapas de limpieza y compresión del gas de síntesis requiere algún consumo de energía. La recuperación total de la energía del proceso utilizando una turbina de ciclo combinado tiene entre 36-40% de eficiencia térmica². Sin embargo, el gas de síntesis generado por el proceso contiene en promedio 45-55% de H₂. Después de la limpieza y el enfriamiento del H₂ puede ser apartado por un separador de membrana. Alternativamente, el H₂ puede ser alimentado directamente a un sistema de celdas a base de combustible para la generación de electricidad y agua. El gas de síntesis (rico en CO) que queda después de la separación de H₂ puede ser utilizado para generar electricidad adicional a través de un generador de turbina.

Han existido mejoras en el proceso de pirólisis y gasificación en el reactor de plasma, lo que nos da como resultado una reducción sustancial en la energía consumida por la antorcha de plasma por tonelada de residuos tratado. Actualmente se requiere de 150-350 Kwh / ton para su tratamiento aproximadamente.

2.1.3 Capacidades de planta de gasificación de Solena Group.

Existen actualmente dos capacidades estándar con sus respectivos módulos para el sistema IPGCC³.

² Robert T. Do, et al., United States. Patent application ser No 6,987,792, applicant. Solena Group “*Plasma Pyrolysis, Gasification and Vitrification of Organic Material*”, Enero 2006.

³ Solena Group, *Solena White Paper*, Abril 2008.

La de mayor capacidad es la instalación que nos puede producir 40MW (basado en los sistemas de energía de ciclo combinado de la firma General Electric MS5001) a partir de una cantidad de RSM que oscila entre 15- 20 toneladas por hora.

La instalación con menor capacidad produce 15 MW (basado en los sistemas de energía de ciclo combinado de la firma General Electric GT10) a partir de una cantidad de RSM que oscila entre 5- 10 toneladas por hora. Tanto para las instalaciones con menor o mayor capacidad es importante considerar que los valores anteriores son de una forma muy general, función de la composición de los RSM.

2.1.4 Desempeño ecológico.

En cuanto al desempeño ambiental se refiere el sistema IPGCC cuenta con una tecnología en donde todos los contaminantes pueden ser eliminados del gas de síntesis a través del reactor PGV. Por lo tanto, la etapa que comprende la limpieza del gas podría contar con un sistema sencillo para el tratamiento del gas de síntesis. En una planta IPGCC se tienen pequeñas fracciones de emisiones de partículas como el SOx, NOx, mercurio, metales volátiles y partículas suspendidas y comparado con otras tecnologías como la incineración son muchos menores⁴.

2.1.4.1 Consideraciones específicas de contaminantes (cenizas, NOx, SOx / Azufre)

En contraste con los quemadores convencionales de carbón o de incineradores de lecho fluidizados, el sistema IPGCC ofrece oportunidades de obtener ingresos adicionales derivados de la recuperación de los subproductos a través de su venta. En un sistema de quemador convencional, los productos de desecho, tales como cenizas, azufre, y los lodos provenientes de la depuración representan un costo importante en términos de costos de operación, tratamiento, transporte y disposición final.

⁴ Solena Group, *Solena Group Environmental Report*, 2006.

A continuación se mencionarán algunos contaminantes que tienen importancia en el impacto al medio ambiente.

- Cenizas.

El reactor PGV no produce cenizas. Convierte todos los materiales inorgánicos de la materia prima en una escoria vítrea de sólido inerte. A diferencia de un sistema de combustión, la alta temperatura del plasma rompe con todas las cadenas de carbono. El resto de materiales inorgánicos se funden a medida que se alcanza la alta temperatura proporcionada por el plasma en escoria fundida, que es sacada y enfriada fuera del reactor en un no-lixiviables y vítreo producto inerte. Este producto, puede ser empleado como material de relleno de construcción, fabricación de ladrillos, azulejos. En esta escoria son capturados e inmovilizados metales pesados peligrosos, por lo que pasa fácilmente las normas referentes a lixiviados⁵.

- NOx.

Para que se tengan emisiones moderadas de NOx, se inyectan vapor, agua, CO₂ y / o nitrógeno en una turbina de combustión de gas de síntesis. Generalmente el nitrógeno es el más usado y en cuanto a las emisiones de NOx de este proceso pueden alcanzar cantidades menores a 10ppm.

- SOx/Azufre.

El azufre es recuperado del gas de síntesis por medio de la etapa de limpieza del gas. Con el sistema *IPGCC*, se puede recuperar el azufre ya sea como ácido sulfúrico o azufre elemental, dependiendo de la región industrial o el comportamiento del mercado agrícola. El azufre es quitado de la corriente de gas de síntesis antes de que llegue a la turbina de combustión de gas, dando como resultado azufre elemental o ácido sulfúrico, los cuales pueden ser comercializados.

⁵ Fuente: Solena Group, *The Utilization of Solena Group Integrated Plasma Gasification Combined Cycle System (IPGCC)*, Solena White Paper, 2006.

La remoción del azufre del gas de síntesis es tan eficiente y alcanza valores cercanos al 99.99%, lo cual es una ventaja con respecto a otras tecnología como la incineración.

- Partículas en suspensión (PM).

El reactor PGV es diseñado para controlar la velocidad superficial del gas caliente y maximizar el tiempo de craqueo térmico, lo cual nos asegura que se tendrán mínimas cantidades de PM en el gas de síntesis. Por cualquier caso, se cuenta con un sistema adicional compuesto principalmente por un ciclón u otro filtro del tipo o depuradores de agua, que nos dan aún mejor un gas de síntesis libre de PM.

- Mercurio.

El mercurio contenido en los residuos sólidos se volatiliza y es expulsado afuera del reactor. En caso de que se tengan cantidades significativas de mercurio, serán utilizados unos filtros fluidizados de carbón activado para eliminar más del 95% del mercurio a costos relativamente bajos.

En México no existe normatividad relativa a la emisión de mercurio; sin embargo, se cuenta con un proyecto de norma oficial mexicana (PROY-NOM-098-ECOL-2000, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes) para las emisiones de los procesos de incineración de residuos en los que se considera un límite de emisión de 0.07 mg/m^3 para el mercurio.

- Emisiones de Gases Invernadero.

El proceso *IPGCC* es aproximadamente 15% -20% más eficiente que el de incineración. Por lo tanto, las emisiones de CO_2 por kW generado también van a ser 5% a 20% menores.

Además, en el sistema *IPGCC*, el carbono puede ser removido del gas de síntesis para crear un combustible de hidrógeno puro que elimina eficazmente las emisiones de CO_2 ⁶.

⁶ Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008.

2.1.4.2 Análisis de emisiones.

En este apartado tratamos de hacer una comparación general de las emisiones que se dan por diferentes tipos de tecnologías, pero cabe destacar que el proceso IPGCC produce la menor cantidad de emisiones en SOx, NOx y cenizas, como se muestra en la tabla 2.1 a continuación:

Tabla 2.1. Análisis de emisiones

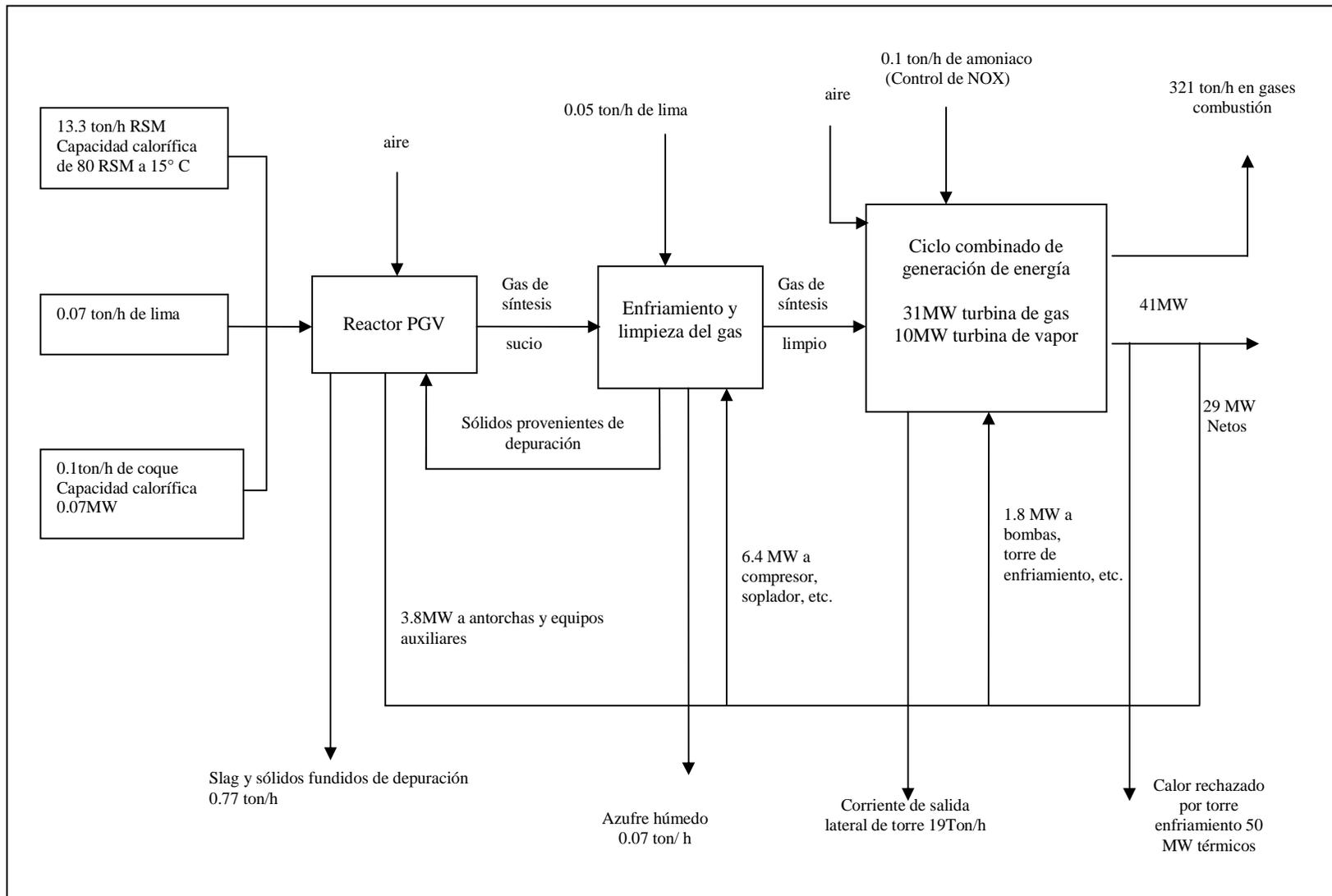
Tecnología	SOx Lb/MWh	NOx Lb/MWh	Cenizas Lb/MWh
Quemador convencional de carbon pulverizado	0.2 - 2.7	1.11 - 7	14
Gasificación fluidizada	2.7	4	14
Gasificación Texaco	0.1 – 0.5	0.56 - 4	0
IPGCC Solena Group	0.1 – 0.5	0.5 - 2	0

Fuente: Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008.

A continuación se mostrará en la figura 2.2 un balance de materia y energía con sus respectivos efluentes y contaminantes del proceso.

En el balance se puede notar que de 13.3 ton/h que se alimentan de RSM se generan 321ton/h en gases de combustión, pero la planta es autosuficiente en energía eléctrica y se tiene un exceso de energía que puede ser comercializado.

Fig. 2.2 Balance de materia y energía en un proyecto genérico de Solena



Fuente: Solena Group, *Introduction to renewable energy production for Bio-power in Puerto Rico*, University of Turabo, 2006.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

2.1.5 Costos de procesamiento

Antes de dar algunos datos relevantes referentes al costo de procesamiento, es necesario saber que el proceso IPGCC se usa aire enriquecido y esto nos permitirá optimizar el volumen de gas de síntesis generado que a su vez se verá reflejado en un menor costo destinado a la limpieza del gas y un menor consumo de energía en las antorchas de plasma.

El gas de síntesis obtenido proporciona una capacidad calorífica que varía de 150-300 BTU/ scf, el cual equivale aproximadamente a 1/3 del gas natural.

Ahora se mostrará en la tabla 2.2, una comparación de los costos de procesamiento usando la tecnología *Natural Gas Combine Cycle (NGCC)* y la tecnología correspondiente a Solena Group *IPGCC* para distintas escalas de procesamiento.

Tabla 2.2 Costos de procesamiento para IPGCC Y NGCC

	NGCC	NGCC	IPGCC	IPGCC
Capacidad (MW)	10	300	10	50
Capital (US\$/KW)	\$850	\$500	\$2500	\$1800
(MM\$'s)	\$8.5	\$150	\$25	\$90
Costo combustible (US\$/mmbtu)	\$5.00	\$5.00		
Tarifa de disposición (\$/ton)			\$40.00	\$40.00
Costo energía (centavos/ kWh)				
Capital	2.05	1.21	6.04	4.35
Cargo				
Combustible	4.06	2.94	(4.00)	(4.00)
O&M	<u>0.32</u>	<u>0.19</u>	<u>1.41</u>	<u>1.01</u>
Total	6.44	4.34	3.45	1.36

Fuente: Solena Group, *Introduction to renewable energy production for Bio-power in Puerto Rico*, University of Turabo, 2006.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Como se puede observar se tienen costos más bajos usando el proceso *IPGCC* de Solena Group para ambas escalas de procesamiento y conforme la escala aumenta se obtiene una mejor rentabilidad. Es necesario también tomar en cuenta la competencia que existe en cuanto a las opciones para la generación de energía, la cual se mostrará a continuación en la tabla 2.3:

Tabla 2.3. Costos referentes a distintos tipos de generación de energía

Tipos de energía	Disponibilidad en %	Costo de instalación US\$/kW	Ajuste para disponibilidad (US\$)	Costo operación US\$/Kw h	Ajuste por disponibilidad (US\$)
Geotérmica	80	\$1,415	\$1,769	\$0.009	\$0.011
Solena	85	\$1,333	\$1,568	\$0.011	\$0.013
Solar	30	\$4,083	\$13,610	\$0.005	\$0.015
Carbón	85	\$1,000	\$1,176	\$0.015	\$0.018
Gas natural(ciclo combinado)	85	\$463	\$545	\$0.021	\$0.024
Viento	31	\$742	\$2,394	\$0.009	\$0.030
Gasificación carbón	40	\$1,300	\$3,250	\$0.015	\$0.018

Fuente: Solena Group, *Introduction to renewable energy production for Bio-power in Puerto Rico*, University of Turabo, 2006.

2.1.6 Innovaciones de Solena Group

Actualmente *Solena*, para poner en práctica su concepto " Bio-Energía", ha adoptado como estrategia ampliar su cadena de producción de energía mediante la obtención de nuevas fuentes de materias primas de biomasa que va más allá de las que son usadas por ahora tales como productos agrícolas que pueden ser trigo y maíz, entre otros. *Solena*, en cooperación con su socio *Biofuel Systems* y la Universidad de Alicante, España, han desarrollado y patentado la producción de microalgas / fitoplancton como materia prima para el proceso de gasificación, con

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

a través de su compañía subsidiaria, *Solena Biofuel Company*. Las especies de micro-algas empleadas son ricas en contenido de hidrocarburos y de lípidos, lo que da como resultado un mayor valor calorífico que los flujos de biomasa convencionales.

La tecnología SPGV rompe eficientemente la larga cadena hidrocarburos contenidas en las micro-algas, lo que genera un gas de síntesis rico en el proceso, que una vez más, proporciona el paso intermedio para su conversión, ya sea en energía renovable o en otros combustibles seleccionados a través de procesos de síntesis química. Las micro-algas empleadas son producidas a gran escala en biorreactores que utilizan la luz solar o artificial para fotosintetizar el dióxido de carbono (CO₂) que dará crecimiento a las algas, que son después eliminadas y secadas para la producción de energía, a diferencia del crecimiento de las plantas convencionales.

La mayor fuente disponible de CO₂ de la Planta de IPGCC proviene de los gases de salida de la turbina, creando así un proceso de circuito cerrado en términos de las emisiones de CO₂. Secuestros de CO₂ adicionales provenientes de otras plantas de energía o plantas de cemento también puede ser alimentados en los biorreactores proporcionando así un efecto de "depósitos de carbono"⁷. Como las microalgas se cultivan in situ junto a la Planta de IPGCC, no hay ningún otro "Ciclo de vida de emisiones".

Debido a la producción de altas concentraciones de algas en las columnas de biorreactores y el uso eficiente de la fotosíntesis artificial, basada en la biomasa de algas por Solena Biofuels puede ser producido a muy gran escala sin necesidad de grandes masas de tierra, como es el caso de cultivos estandarizados para producir energía. Para fines comparativos, una hectárea de tierra puede ser usada para mantener miles de biorreactores que produzcan hasta 40,000 toneladas de micro algas por año frente a 4000 hectáreas de tierra necesarias para producir 400 toneladas por año de cultivos con fines energéticos⁸.

⁷ Depósito de carbono: todo componente del sistema climático que almacena un gas de efecto invernadero o un precursor de un GEI (UN 1992).

⁸ Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008.

2.2 Tecnología *Direct Melting System (DMS)* de Nippon Steel⁹.

2.2.1 Antecedentes *Nippon Steel*

Nippon Steel Corporation es una compañía enfocada a la industria siderúrgica, la cual ha desempeñado un papel importante para el crecimiento del Japón moderno. La empresa opera 11 plantas principales de acero con una producción de cerca de 33 millones de toneladas de acero anual y comercializa sus productos a nivel mundial.

Los orígenes de la empresa datan del 1 de abril de 1970 por la fusión de dos empresas Yawata Steel y Fuji Steels. *Nippon Steel Corporation* entre otras cosas, realiza una amplia gama de actividades: ingeniería de negocios destinada al desarrollo urbano, investigación de nuevos materiales, la elaboración de productos químicos y sobretodo se han enfocado a desarrollar tecnologías aplicadas al reciclaje para frenar el calentamiento global.

Surgió después la necesidad de crear *Nippon Steel Engineering Corporation*, que es una división que tenía como fin la reducción del impacto ambiental en todas las etapas de operación, desde la adquisición de materia prima, y los equipos de producción, el transporte, el uso y eliminación de productos. La compañía responde adecuadamente a las nuevas reglamentaciones ambientales, a través de un amplio y enérgico ejercicio de controles voluntarios, e innovaciones en cada fase del proceso de producción supervisando las emisiones contaminantes al ambiente¹⁰.

Mientras que los problemas ambientales como las emisiones de dioxinas se están convirtiendo en la principal preocupación, en esta situación, la gasificación y la fusión de los desechos llegaron a llamar la atención desde la década de 1990. Por esta razón *Nippon Steel* construyó el primer horno de fusión en 1979.

⁹ Toda esta sección ha sido resumida del trabajo de investigación “Estudio de la tecnología *Nippon Steel* para el tratamiento de RSM y recuperación de energía” elaborado por Ramos Garrido, Oddet, incluyendo tablas y figuras.

¹⁰ La página <http://www.nsc.co.jp> fue consultada el día 27 de julio del 2008 (pagina principal de *Nippon Steel*).

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

El proceso de fusión directa de RSM convierte una planta de incineración convencional con la única función de la reducción del volumen de residuos en una planta de reciclaje. *Nippon Steel Corporation* (de fusión directa y sistema de reciclado) para los residuos sólidos municipales es un precursor de este concepto, donde emplea un horno para gasificar y fundir los desechos a altas temperaturas, y se caracteriza sobre todo por la formación de altas temperaturas en la cama de coque en la capa inferior del horno.

2.2.2 Localización de plantas con tecnología *Direct Melting System(DMS)*.

Es importante hacer notar que Nippon Steel cuenta con muchas plantas ubicadas en su mayoría en Japón. Se consideraron para el análisis de la tecnología la localización de las plantas incluyendo la mencionada en los antecedentes que fue construida en 1979, también el tipo de residuos que ellos tratan en los reactores, así como la capacidad de los reactores en toneladas por día y la utilidad del calor residual de estos reactores.

A continuación se mostrará en la tabla 2.4 las plantas construidas por Nippon Steel con la tecnología DMS.

Tabla 2.4. Plantas de tratamiento de RSM con tecnología Nippon Steel

Localización	Tratamiento de residuos	Capacidad	Año de arranque	Utilización de calor residual
Ciudad de Kamaishi (Iwate)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, CFC gas)	100 t/d (50 t/d x 2 hornos)	Septiembre 1979	Agua caliente de recuperación
Ciudad de Ibaraki (Osaka)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, CFC gas)	450 t/d (150t/d x 3 hornos) 300 t/d (150 t/d x 2 hornos) 150 t/d (renovado)	Agosto 1980 Abril 1996 Abril 1999	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 10,000 kW)
Iryu unión de administración de salud (Hyogo)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles)	120 t/d (60 t/d x 2 hornos)	Abril 1997	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,100 kW)
Instalación oriente de incineración (Kagawa)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, residuos de la incineración)	130 t/d (65 t/d x 2 hornos) 65 t/d(adicionales)	Abril 1997 Abril 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,600 kW +1,100 kW)
Ciudad de Lizuka (Fukuoka)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos)	180 t/d (90 t/d x 2 hornos)	Abril 1998	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,200 kW)
Itoshima área de lucha contra incendios & instalaciones de la unión (Fukuoka)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos, residuos de la incineración, CFC gas)	200 t/d (100 t/d x 2 hornos)	Abril 2000	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 3,000 kW)
Ciudad de Kameyama	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y de los vertederos)	80 t/d (40 t/d x 2 hornos)	Abril 2000	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,250 kW)
Ciudad de Akita	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos, residuos de la incineración)	400 t/d (200 t/d x 2 hornos)	Abril 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 8,500 kW)
Ciudad de Niigata (Yoroigata centro limpio)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos, residuos de la incineración, CFC gas)	120 t/d (60 t/d x 2 hornos)	Abril 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,500 kW)

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Continuación de tabla 2.4. Plantas de tratamiento RSM con tecnología Nippon Steel

Localización	Tratamiento de residuos	Capacidad	Año de arranque	Utilización de calor residual
Kazusa sistema limpio Co (Chiba)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, residuos de la incineración y lodos)	200 t/d (100 t/d x 2 hornos)	Abril 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad :3,000 y 5,000 kW)
		250 t/d (125 t/d x hornos)	Marzo 2006	
Aldea Takizawa (Iwate)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles)	100 t/d (50 t/d x 2 hornos)	Octubre 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,200 kW)
Ciudad Narashino (Chibia)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos)	201t/d (67t/d x 3 hornos)	Noviembre 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,400 kW)
Administrativa región municipal Hata (Kochi)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos)	140 t/d (70 t/d x 2 hornos)	Diciembre 2002	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,800 kW)
Cuidad Tajimi (Gifu)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos)	170t/d (85 t/d x 2 hornos)	Abril 2003	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,990 kW)
Toyokawa Hoi (Aichi)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos, residuos de lodos de incineración)	130 t/d (65 t/d x 2 hornos)	Abril 2003	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,850 kW)
Ciudad Oita	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles y lodos)	387 t/d (129 t/d x 3 hornos)	Abril 2003	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 9,500 kW)
Unión ambiental Genkia (planta Munakata) Fukuoka	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos)	160/d (80 t/d x 2 hornos)	Junio 2003	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 2,400 kW)
Unión del mantenimiento del medio ambiente (Seinoh) Gifu	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, residuos de la incineración)	90 t/d (90 t/d x 1 hornos)	Abril 2004	Agua caliente de recuperación
Kita- kyush (Fukuoka)	Residuos industriales (incluyendo residuos de la trituración)	320 t/d (160 t/d x 2 hornos)	Marzo2005	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 14,000 kW)
Nagoya (Nippon Steel) (Aichi)	Residuos industriales (residuos de la trituración)	120 t/d (120 t/d x 1 horno)	Febrero 2006	Suministro interno de vapor
Ciudad de Shimada (Shizuoka)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos)	148 t/d (74 t/d x 2 hornos)	Marzo 2006	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 1,990 kW)
Ciudad Kita-Kyushu (Fukuoka)	Residuos sólidos municipales (incluyendo incombustibles, lodos)	720 t/d (140 t/d x 3 hornos)	Marzo 2007	Caldera de calor residual /generación de energía (capacidad : 23,500 kW)

Fuente: "Estudio de la tecnología Nippon Steel para el tratamiento de RSM y recuperación de energía" por Ramos Garrido, Oddet.

2.2.3 Descripción del proceso *Direct Melting System*(DMS).

La planta de tratamiento RSM en la ciudad de Kamaishi, tiene dos hornos de fusión con una capacidad nominal de 50 ton / día cada uno.

El proceso Nippon Steel consiste fundamentalmente en: La recepción de los RSM en la plataforma del vertedero, éstos son sustraídos mediante la grúa de residuos para ser llevados a la tolva de alimentación del horno de fusión de 50 ton/ día , en donde también se alimenta simultáneamente coque y piedra caliza , el equipo de alimentación de residuos se construyó con doble sello en la válvula, de gas diseñado para aislar completamente la atmósfera del horno del aire exterior.

Cuando la señal del medidor de nivel de carga instalada en el horno indica que el nivel de carga ha bajado al nivel especificado, el material fundido se descarga a través de un orificio por la parte inferior del horno y es enfriado rápidamente en el tanque de agua de granulación. Los gránulos son separados mediante separación magnética en escoria y en metal para ser vendidos.

Los gases generados por la descomposición térmica son liberados por la parte superior del horno para ser quemados completamente por la cámara de combustión. El calor de combustión de los residuos de gas es recuperado por el generador de agua caliente, y enfriado por gas refrigerante, después es pasado por un precipitador electrostático. La recolección de polvo de ceniza de la cámara de combustión, del enfriador de gas y del precipitador electroestático son tratadas mediante la adición de un reactivo para hacerlas no contaminantes.

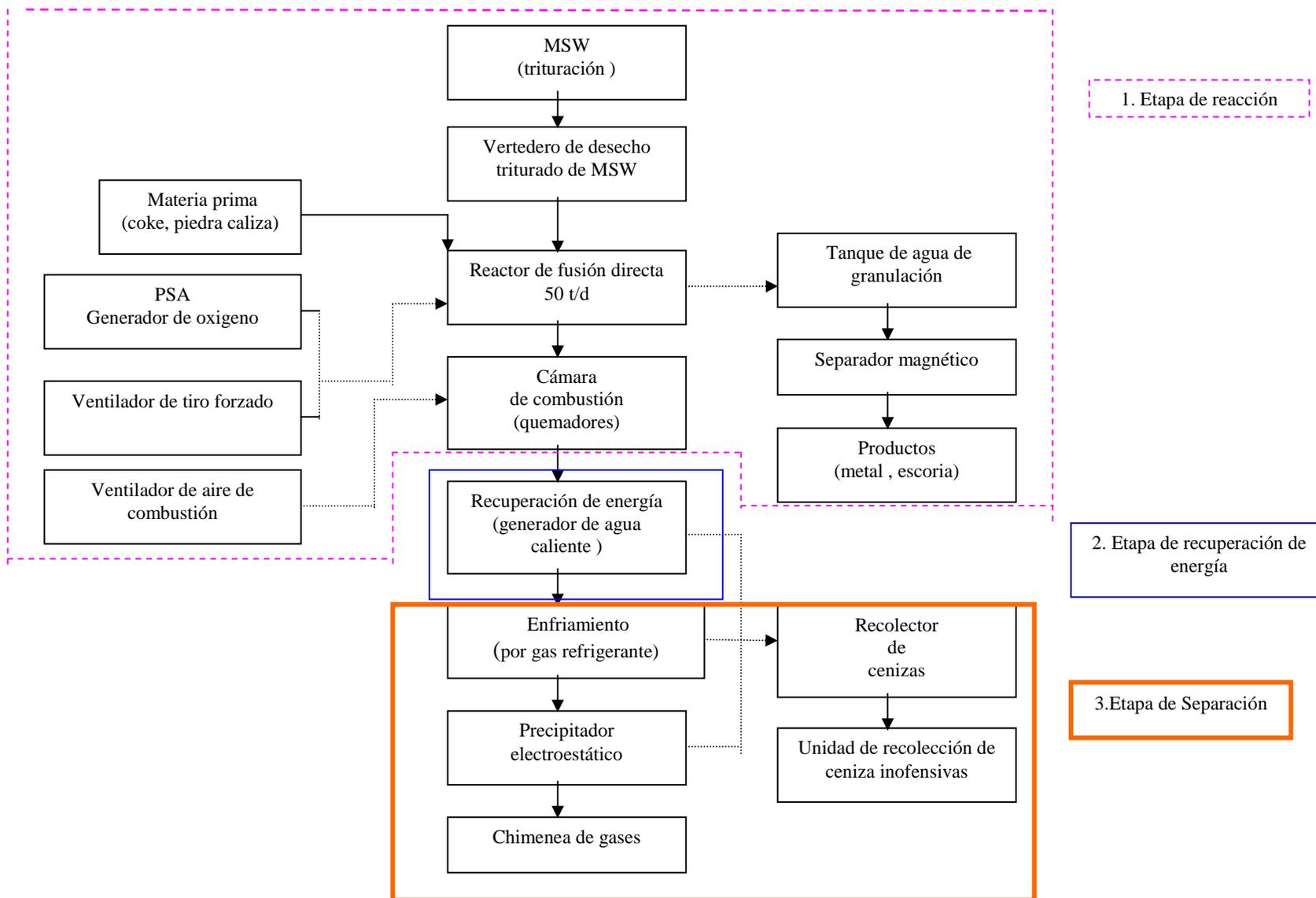
Un ventilador de tiro forzado se utiliza para soplar aire en el horno. La PSA¹¹ alimenta aire enriquecido con oxígeno que se suministra a través de la fila superior de tuyeres¹².

Como se puede observar en la figura 2.3 se puede observar un diagrama de bloques del proceso de Nippon Steel descrito por etapas y en la figura 2.4 se engloba un diagrama de flujo simplificado de éste mismo.

¹¹ PSA. La palabra proviene de Pressure Swing Adsorption que significa absorción de oscilador de presión. El aire del entorno pasa a un compresor. Una vez comprimido el aire pasa por un tamiz molecular de zeolita sintética. Este medio de absorción atrae el nitrógeno y otras impurezas a alta presión produciendo 95% de oxígeno puro.

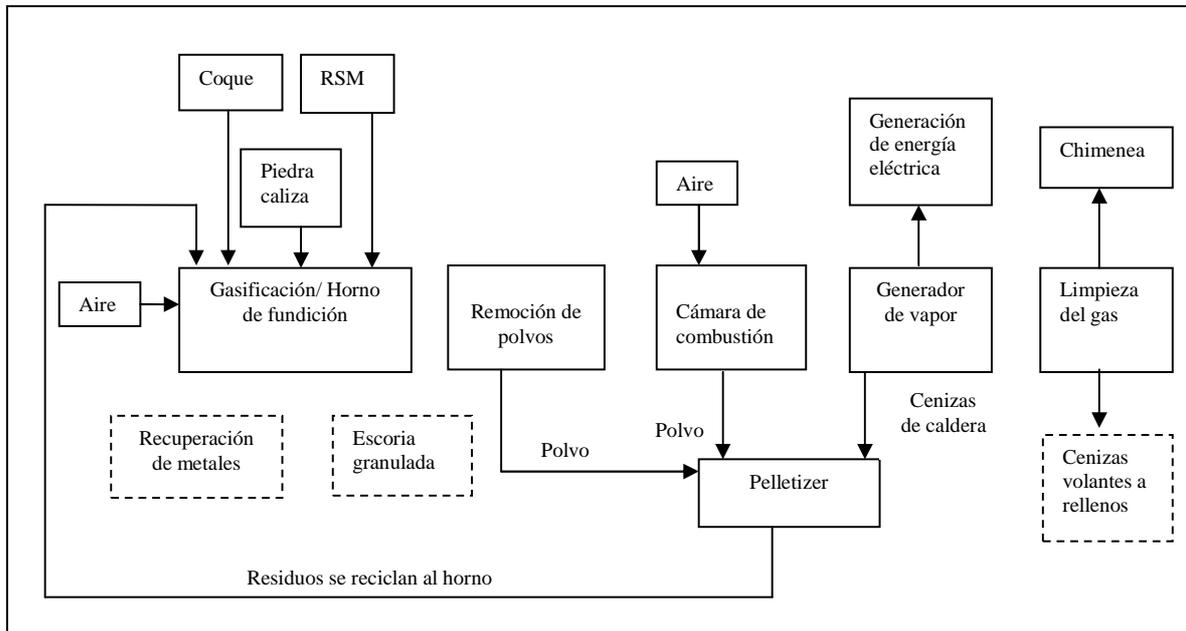
¹² Tawara, Youichi, et al., *Research and Development of Direct Melting Process for Municipal Solid Waste*, Nippon Steel Technical Report No. 70, July 1996.

Fig. 2.3. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento RSM con la tecnología Nippon Steel separado por etapas



Fuente: “Estudio de la tecnología Nippon Steel para el tratamiento de RSM y recuperación de energía” por Ramos Garrido, Oddet.

Figura 2.4. Diagrama simplificado del proceso DMS de Nippon Steel



Fuente: W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, sin fecha.

2.2.4 Descripción del las etapas del proceso de tratamiento de RSM

Para hacer el estudio de la planta de proceso de tratamiento de RSM se ha dividido en tres etapas principales que son:

1. Etapa de reacción
2. Etapa de recuperación de energía
3. Etapa de separación y tratamiento de las gases a la atmósfera

2.2.4.1 Etapa de reacción

Está etapa consiste en un reactor de fusión y una cámara de combustión como equipos principales donde se llevan acabo los tratamiento de los residuos y la quema de los gases de escape.

Los residuos combustibles e incombustibles y el coque se cargan en la sección de entrada (el puerto de carga), en esta zona se lleva acabo el precalentamiento, a una temperatura aproximada de 300°C para eliminar el agua de los residuos , los residuos, sucesivamente derretidos por la acción del gas de reacción (descomposición térmica del gas), zona donde se lleva a cabo la gasificación a un rango de temperatura de 300-1000 °C. En la parte inferior de la descomposición

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

térmica existe una gran cantidad de partículas de carbón a medio quemar (carbonilla), zona donde se lleva a cabo la combustión en un rango de temperaturas de 1000-1700 °C. La quema de carbonilla se lleva a cabo por alimentación de aire en los tuyeres a condiciones de 130 m³ por una tonelada alimentada de residuo. En la parte inferior del horno se encuentra la zona de fusión en un rango de temperaturas 1700-1800 °C. La quema de combustible y la fusión de los residuos de sustancia incombustibles se lleva cabo por la alimentación de aire más oxígeno en los tuyeres, los gases de escape producidos por la descomposición térmica y la fusión se elevan hacia la parte superior para ser transferidos a la tubería de gases de escape (ducto). Los residuos generados en una ciudad, contiene una cantidad de combustible compuesta por: caucho en 26.6%, basura en 47.4%, plásticos 8.0%, y los incombustible en un 18.0%. En este caso el contenido de agua en lo residuos es de 40 a 60%, siendo que es necesario eliminar el agua de los residuos, si los residuos no están lo suficientemente secos, cuando entran a la zona de quema y de fusión, pues la temperatura en estas zonas se reduce notablemente; en consecuencia es necesario proporcionar una gran cantidad de calor para secar los residuos cargados en el reactor y ser derretidos a fin de que se produzcan las reacciones pirogénicas con el consiguiente uso de energía externa. Como se describió antes, con el fin de quemar los residuos que contienen una cantidad considerable de sustancias combustibles es necesario alimentar con un gas, que contiene oxígeno en una alta concentración. El aire que se alimenta al reactor se divide en dos partes, en la que una porción de aire se alimenta a la zona de combustión por los tuyeres, y la otra porción de aire enriquecido con oxígeno se alimenta a la etapa de fusión por los tuyeres que se encuentra en la parte más baja del reactor, siendo que la concentración de oxígeno es de 30 a 40 %. Cuando el aire enriquecido entra por los tuyeres, en una relación de 600 m³ por una tonelada alimentada de residuos, la cantidad de coque que se utiliza en el reactor se reduce de 20 por cada 100 Kg. a una tonelada de residuo.

La quema de combustibles y la fusión de los residuos crean el aumento de los gases de escape hacia la parte superior del rector de fusión, estos gases salen a

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

en un rango de temperaturas de 150-700 °C, esta temperatura es controlada cuando los gases de escape pasan por la zona de secado ajustando la capa empacada¹³. La temperatura es medida con los múltiples termómetros colocados en todo el reactor. Cuando la temperatura de los gases de escape es inferior a los 150 °C, la descomposición térmica se realiza a temperaturas bajas incrementando el contenido de alquitrán en el gas de escape, la concentración de alquitrán generado como resultado de ello hace que la permeabilidad del gas en la zona de secado se deteriore y haciendo difícil el funcionamiento del reactor. Para el caso que la temperatura de los gases de escape sea superior a 700 °C, hay formación de cloro el cual se neutraliza, los gases de escape se transforman en ácido clorhídrico de acuerdo a la reacción química :



Dado que el ácido clorhídrico se genera como se ha descrito en la reacción, éste genera corrosión en la parte superior del reactor de fusión y en el conducto de los gases de escape. Con el fin de evitar la corrosión, es necesario el diseño de un reactor de fusión con una resistencia a ésta. Además, los compuestos químicos de bajo punto de fusión contenidos en los gases de escape se adhieren a la parte superior del reactor de fusión y al ducto de salida de los gases, por lo tanto hace difícil el funcionamiento del reactor durante un largo período de tiempo.

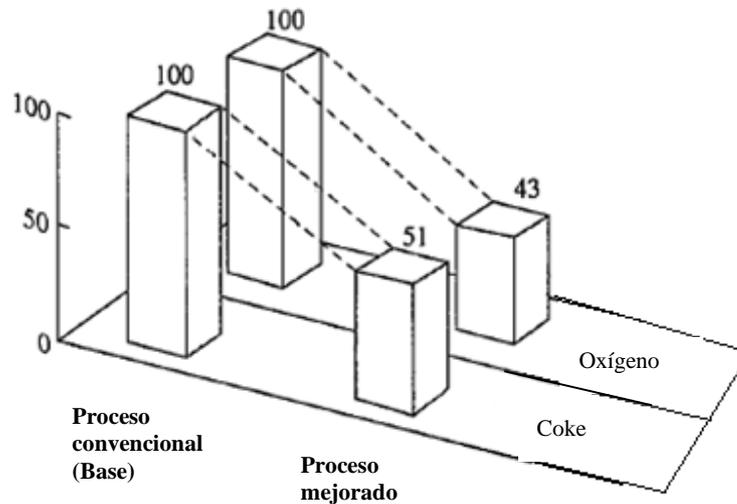
2.2.4.2 Plantas PSA para producción de oxígeno.

El proceso convencional para el tratamiento de RSM era la alimentación de coque más aire; para la mejora del proceso se implementó la alimentación de aire enriquecido con oxígeno, con el fin de reducir el consumo de materias auxiliares. Éste efecto se ve en la figura No. 2.4 Para excluir el efecto de diferencia en la calidad de los residuos entre los mejorados y los procesos convencionales, el flujo de coque (Kg/h) y flujo de oxígeno PSA (m³/ h) por unidad de carbono (Kg/h) suministrado de los desechos, se trazan a lo largo del eje vertical, contra 100 para la relación con el proceso convencional.

¹³ Capas empacadas, contiene desechos sólidos, más el coque alimentado y partículas de carbón a medio quemar.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Fig. 2.5 Efecto de la mejora en el reactor de fusión para reducir el consumo de materias primas auxiliares.



Fuente: Figura tomada de la investigación “Estudio de la tecnología Nippon Steel para el tratamiento de RSM y recuperación de energía” por Ramos Garrido, Oddet.

Donde la mejora del proceso de coque y la planta PSA registraron un índice de consumo de oxígeno del 51 y el 43 % respectivamente¹⁴. Con esto se puede leer un ahorro importante de estos insumos. Como ya se mencionó anteriormente, en la zona de combustión (parte superior) se alimenta aire mediante un ventilador de tiro forzado, y en la zona de fusión (parte inferior) se suministra aire enriquecido con oxígeno mediante una PSA, el total de oxígeno alimentado tanto en la etapa superior e inferior por los tuyeres es de 130 a 600 m³ por cada tonelada de residuo. Pressure Swing Adsorption (PSA) es una tecnología que se emplea para separar alguna especie de gas a partir de una mezcla de gases a presión de acuerdo a la especie y las características moleculares de afinidad por un material adsorbente, por ejemplo zeolitas tamiz molecular, que adsorben selectivamente nitrógeno, el dióxido de carbono y la humedad del gas.

El proceso de tratamiento de RSM utiliza entonces una planta de producción de gas oxígeno, que es co-producido, con nitrógeno, argón y otros gases raros colectivamente. Las plantas de oxígeno pueden ser descritas como altamente económicas y el sistema ofrece un suministro continuo de oxígeno por el cambio

¹⁴ Tawara, Youichi, et al., *Research and Development of Direct Melting Process for Municipal Solid Waste*, Nippon Steel Technical Report No. 70, July 1996.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

automático de las torres en un tiempo de ciclo. Estos sistemas de PSA suelen funcionar a velocidades lentas de ciclo de 0.05-0.5 ciclos / minuto¹⁵.

2.2.4.3 Cámara de combustión

La cámara de combustión es el elemento dentro del cual una mezcla de combustible y aire a alta presión se queman, los gases liberados del reactor de fusión CO, CO₂, O₂, H₂, CH₄, entran a la cámara para dar inicio a la combustión, la cual es una reacción química en la que los gases de escape se combinan con el oxígeno en forma de O₂ gaseoso, desprendiendo calor y produciendo un óxido, la combustión de los gases es una reacción exotérmica debido a que su descomposición en los elementos, libera energía térmica (calor al quemar) y energía luminosa (luz al arder).

Los productos de la reacción de combustión son: CO, CO₂, O₂, NO_x, éstos pasan a la turbina con una temperatura uniforme para la generación de energía y por la parte inferior de la cámara de combustión son liberadas las ceniza y el agua.

2.2.4.4 Etapa de recuperación de energía.

Los gases calientes que salen de la cámara de combustión (CO, CO₂, O, NO_x) contienen un poder calorífico medio¹⁶. Los gases no necesitan tratamiento previo ya que son oxidados en la combustión y los gases entran a la caldera para calentar el agua que pasa por el serpentín, generan vapor a una temperatura de 520 °C y el vapor se utiliza para alimentar una turbina de vapor que acoplada a un generador produce energía, siendo que el calor desechado por la turbina es reutilizado.

2.2.4.5 Etapa de separación.

El enfriamiento de los gases se da por medio de una cámara de enfriado, por un gas refrigerante. Este gas circula por las tuberías que recorren todo el sistema.

¹⁵ <http://www.gas-plants.com/pressure-swing-adsorption.html>. Consultada el día 17 de Septiembre de 2008.

¹⁶ Se llama poder calorífico al calor que se libera en el proceso de combustión de un cuerpo, llamado combustible. El poder calorífico se mide como la cantidad de calorías o kilocalorías que se desprenden en la combustión de 1 kg de masa del material combustible.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Las propiedades de este gas hacen posible el intercambio de temperatura, o lo que es lo mismo, la refrigeración.

Los gases refrigerantes se clasifican de forma muy general en los tipos siguientes: Derivados halogenados saturados. Proceden del metano, etano y propano por sustitución parcial o total de los átomos de hidrógeno por átomos de Cl, F. Pueden ser del tipo:

a) Clorofluorocarbonados (CFC). Contienen Cl, F y C en su molécula. Estos refrigerantes dejaron de utilizarse a finales de 1994.

b) Hidroclorofluorocarbonados (HCFC). Contienen H, Cl, F y C en su molécula. Dejarán de producirse en Europa a finales del 2014. c) Hidrofluorocarbonados

(HFC). Contienen H, F y C en su molécula. Son compuestos que no perjudican la capa de ozono; poseen un Potencial de Agotamiento de Ozono nulo (ODP, por sus siglas en inglés).

d) Perfluorocarbonados (PFC). Sólo contienen F y C. El prefijo "per" hace referencia a que el compuesto tiene el máximo número posible de átomos de fluor. Son compuestos que no perjudican la capa de ozono, poseen un ODP nulo.

Una parte importante en la etapa de separación es cuando los gases pasan por el precipitador electrostático, ya que estos contiene partículas que necesitan ser filtradas; para la filtración de partículas, se utilizan fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. Todo precipitador está constituido de un electrodo emisor y un electrodo o placa recolectora. La forma en que se disponen dichos electrodos y el método para limpiar los colectores (golpes o agua), marcan la diferencia entre los distintos tipos de precipitadores.

En el proceso, las partículas desprendidas caen por gravedad hacia el fondo del filtro, depositándose finalmente en el fondo de la tolva, desde donde el polvo se extrae por un aparato de transporte mecánico (por ejemplo, una cinta transportadora), o por un sistema neumático. La recolección de polvo de ceniza se hace a la salida del enfriador y del precipitador electrostático donde las cenizas no contaminan por el tratamiento específico.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

2.2.5 Tratamiento de los gases a la atmósfera.

Con objeto de evitar la emisión de gases y partículas contaminantes a la atmósfera, es necesario dar a éstos un tratamiento mediante el uso de equipos de control, para eliminar el material particulado y los gases nocivos (SO_x, NO_x, etc.). Este objetivo se puede conseguir mediante el uso de equipos lavadores de gases, filtros, precipitadores electrostáticos y ciclones, tal como se utiliza en este proceso. Un ventilador de tiro forzado sopla los gases ya limpios de partículas sólidas hacia un reactor catalítico para pasarlos después a la chimenea de gases.

2.2.6. Balances de materia y energía en el proceso de Nippon Steel.

Un simplificado balance de masa para el proceso de Nippon Steel es presentado en la tabla 5. Se debe hacer notar que los datos reflejan la calidad con que los RSM son procesados. Este tiene un alto contenido de humedad cercano al 50% y menor contenido de cenizas, como el 10%. El requerimiento de oxígeno y coque para el proceso de Nippon Steel es significativo. Esto se verá reflejado en los costos de operación y en la recuperación de energía obtenida que oscila en los 400 kWh/ ton de RSM procesada. Esto refleja el bajo poder calorífico obtenido de los RSM de Japón y los requerimientos de energía de la planta de oxígeno. También de cualquier forma, se incluye la energía introducida por el coque.

Tabla 2.5 Balance de masa simplificado del proceso Nippon Steel.

Corrientes (para RSM con GCV de 8.5 MJ/kg)	Kg / ton de RSM
Oxígeno	No especificado
Caliza	50
Coke	40-50
Productos reciclables	
Escoria granulado	90
Aleación de hierro- enriquecido	10
Residuos a rellenos	
Cenizas volantes	30

Fuente: W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, sin fecha.

2.2.7 Evolución tecnológica.

Para la mejora del proceso, se han desarrollado nuevas innovaciones en los equipos principales, es decir, en el reactor de fusión, en la cámara de combustión y en la planta de oxígeno, para dar inicio a la segunda generación de plantas. Además de estos, en vista de la última creciente necesidad de prevenir el calentamiento global y la reducción de los costos de operación, la empresa ha reforzado las funciones del proceso de fusión directa a través de medidas como nuevas tecnologías en el proceso. Este apartado se centra en la tecnología de inyección de combustible a través de tuyeres y la diversificación de los tipos de desechos en el proceso, tamaño y expansión. Las innovaciones dan paso al proceso de segunda generación y para ello se utilizó la tecnología de inyección de polvo combustible que será descrita continuación.

2.2.8 Innovaciones del proceso de tratamiento RSM con tecnología Nippon Steel.

2.2.8.1 Innovaciones en el reactor de fusión.

1. Inyección o soplado de polvo combustible.

Con el fin de mejorar el rendimiento de los hornos de fusión directa de los residuos sólidos municipales, se ha desarrollado una nueva tecnologías para la inyección de combustible a través de tuyeres¹⁷. Nippon Steel ha estudiado las medidas para reducir el consumo de coque sin dejar de mantener las ventajas de coque en el proceso y se centró la atención en la inyección de un multi-nivel de aire soplado. Este método usa tuyeres dispuestos en dos o más niveles de altura en el reactor de fusión y tiene por objeto acelerar la marcha de los hornos de combustión de carbón en residuos para utilizar el calor de combustión para el secado y gasificar desechos como un sustituto parcial del coque.

Debido a que la cantidad de carbono en el coque es insuficiente a veces, se pensó que sería necesario proporcionar una fuente adicional de carbono, un combustible inyectado por la parte inferior del horno, a fin de disminuir aún más el consumo de coque, y se inició el desarrollo de una tecnología de inyección de combustible a

¹⁷ *Development of High-performance Direct Melting Process for Municipal Solid Waste*, Nippon Steel Technical Report No. 92, July 2005.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

través de tuyeres. En este sentido, es esencial que la combustibilidad del combustible que se inyecte debe ser igual o mejor que la de coque, de materiales como granos finos de los residuos plásticos (combustibles) y de polvo generado por el horno de fusión, que sean prometedores para el efecto. La prueba consiste en la cama de coque, en la parte inferior del reactor de fusión, usando la alta temperatura de combustión. El polvo combustible es descargado de la bandeja de alimentación que se transporta a cada uno de los tuyeres que se encuentran en la parte baja del horno, mezclándose simultáneamente por el flujo de aire y oxígeno soplado al horno.

2) Torre de vacío. La torre de vacío maneja una velocidad de 0.15-1.0 m/s de acuerdo al tamaño de partícula de la capa de relleno.

Efecto: La torre de vacío en el reactor de fusión, sirve para controlar de acuerdo con el tamaño de partícula, los desechos que forman la capa de relleno que está formada por ceniza y materiales no quemados, generados por la combustión incompleta. En este método los residuos del reactor de fusión, como carbón y sustancias combustibles, son pasadas por la parte superior del reactor, junto con el oxígeno suministrado por los tuyeres; los residuos como cenizas y materiales no quemados son descargados por la parte inferior del reactor.

3. Caldera de calor residual

Efecto: Sirve para el tratamiento de los gases de escape. Está compuesta de una caldera para la generación de vapor mediante el uso de los gases de combustión generados en el reactor de fusión.

4. Colector de polvo

Efecto: Sirve para recoger el polvo de combustible dado por la descomposición térmica y elimina mediante procesos físico-químicos las partículas presentes en el gas. Está instalado entre el reactor de fusión y la cámara de combustión.

5. Reducción de la cantidad de oxígeno añadido.

Efecto: Sirve para reducir la cantidad de consumo de oxígeno. El coque y las escorias depositadas en una porción inferior en el reactor son calentadas con un aparato de irradiación de microondas y al mismo tiempo se da la combustión de

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

coque con aire soplado de la planta PSA en la etapa más baja, para fundir los residuos en descomposición térmica.

6. Tratamiento de los gases de escape generados por la cámara de combustión

Efectos: Los gases de escape del reactor de fusión y del horno de precalentamiento, son completamente quemados en una torre de combustión. Después de que el gas se mantiene a altas temperaturas, la de los gases de escape se reduce en una torre de enfriamiento. El gas residual diluido se alimenta en un precipitador para eliminar las dioxinas y compuestos relacionados simultáneamente con la eliminación de polvo.

2.2.8.2 Innovación en la cámara de combustión.

1. Soplado de aire a la cámara de combustión a través de un ventilador

Efecto: Se trata de soplar aire por medio de un ventilador para el enfriamiento del quemador y el enfriamiento de tuberías, además que sopla los residuos que pasan al enfriador de gas.

2. Quemador de petróleo en la cámara de combustión.

Efecto: Sirve para prevenir la formación de clinker en el puerto del quemador con la quema de petróleo para el sistema de tratamiento de gases de escape provenientes de la quema de residuos en el reactor de fusión.

2.3 Proceso *Plasma Enhanced Melter* (PET™) de Integrated Environmental Technologies (IET)

2.3.1 Antecedentes Integrated Environmental Technologies (IET)

Integrated Environmental Technologies (IET) es una compañía que fue fundada en 1995, que incorporó tecnología proveniente de la compañía Battelle Pacific Northwest Laboratories. Sus fundadores fueron científicos líderes e ingenieros en los programas de investigación de vitrificación en el Department of Energy (DOE) en Battelle y en Laboratorio de Fusión de Plasma del Massachusetts Institute of Technology's (MIT 'S).

La tecnología del proceso PET™ ha sido desarrollada por más de 20 años a través del patrocinio del gobierno de los E.E.U.U para investigaciones enfocadas al tratamiento de residuos nucleares dentro de este proceso. IET ha desarrollado el proceso PET™ para el procesamiento de desechos usando tecnología con licencia de DOE. Combinando la tecnología DOE con financiamiento e innovación del sector privado, el proceso PET™ ha sido adaptado para aplicaciones comerciales.

IET ha invertido veinticinco millones de dólares para poder competir en el mercado actual y IET tiene cerca de treinta empleados de los cuales la mayoría están ubicados en la sede de Richland, WA.

El proceso PET™ integra muchos subsistemas y tecnologías específicas, algunas de ellas con sus propias patentes IET, en un sistema de tratamiento de residuos destinados a tratar los desechos para destruir o inmovilizar constituyentes peligrosos, reducir la masa de los residuos y el volumen destinado a disposición final, así como también para recuperar energía y productos valiosos¹⁸.

2.3.2 Descripción general del proceso PET™.

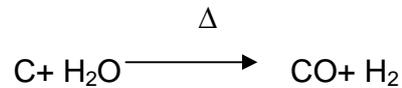
2.3.2.1 Principios de la tecnología PET™

IET ha desarrollado un sistema de gasificación y vitrificación para el tratamiento de los diferentes tipos de residuos sólidos: municipales, médicos, químicos y peligrosos. El proceso PET™ usa un arco de plasma de corriente directa (CD) para la destrucción de este tipo de residuos y para llevar a cabo la gasificación.

¹⁸ Fuente: Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 13, 2003.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

La reacción involucrada en este proceso es una reformación:



Es producido también parte de CO_2 y CH_4 dependiendo de la composición de la corriente de alimentación y las operaciones de condición. Muchos materiales orgánicos de estructura compleja reaccionan de manera similar. Los materiales inorgánicos son fundidos e incorporados en un baño con vidrio fundido.

El reactor es el corazón del proceso PEM™ y es el lugar donde los materiales de desecho se procesan para la producción de hidrógeno, gas de síntesis, así como productos de vidrio y de metal.

Dos fuentes de energía se utilizan para procesar los residuos: la CD (corriente continua) de zona de arco de plasma y la CA (corriente alterna). El plasma originado por la CD calienta los

residuos en un ambiente reductor formado por vapor de agua y un gas inerte, de tal manera que los residuos orgánicos son gasificados mientras que los metales y minerales contenidos se funden para formar un baño fundido. Los compuestos orgánicos gasificados reaccionan con el vapor de agua y oxígeno para producir un hidrógeno enriquecido en gas de síntesis. La cámara está diseñada para operar con seguridad, fiabilidad y tener suficiente tiempo de residencia, siendo que la temperatura está cuidada de tal manera que los orgánicos, incluidos los agentes biológicos y patógenos, que figuran en los residuos, serán destruidos en su totalidad, al tiempo que se mantienen bajos los niveles de partículas y metales pesados.

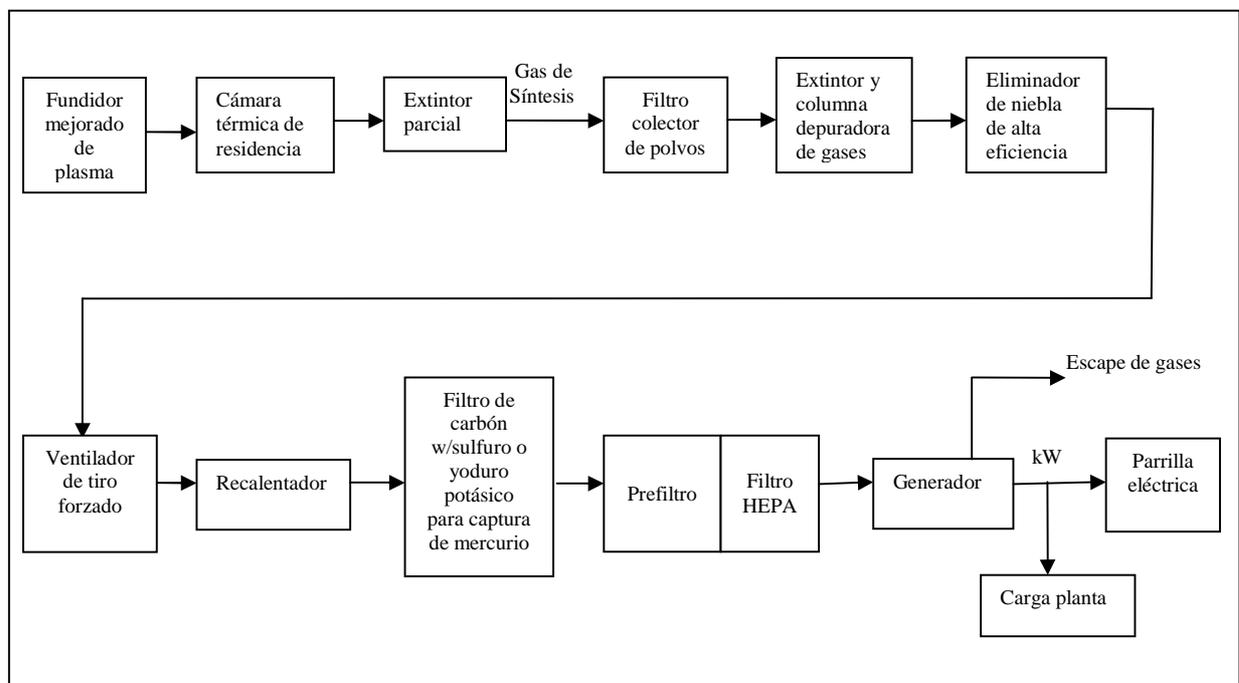
La cámara tiene capacidad para recibir los aditivos, los flujos que se mezclan con los metales fundidos y componentes inorgánicos de los residuos, para producir un vidrio resistente a lo lechoso. El flujo de proceso para la cámara de proceso se basa en la recepción de residuos y vidrio antiguo proveniente de los residuos de la alimentación. Los residuos entran en la cámara de proceso y caen a través de la superficie de vidrio fundido donde existen altas temperaturas logradas por el plasma, formando así una pila donde el material de desecho sigue siendo expuesto tanto a la energía de plasma CD como al joule de calentamiento del

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

vidrio. Se inyecta vapor en la parte superior de la cámara de proceso, en la región de la pila de residuos, para lograr una reformación de los vapores orgánicos. Los compuestos orgánicos en los residuos se disocian a sus elementos, en ausencia de oxígeno, y es reformado para producir CO, H₂, HCl, N₂ y H₂S. Los óxidos inorgánicos se disuelven en la fase de vidrio. Los metales presentes en los residuos se funden y se van a la parte inferior del tanque. El gas de síntesis de proceso, que consta de H₂ y CO se retira de la cámara a través de una abertura de un tubo, y posteriormente tratado por el proceso de sistema depurador de gas. La cámara de proceso se mantiene bajo un ligero vacío por el gas fuera del sistema de ventilación para asegurar que ningún de los vapores o gases del proceso sin tratar se escapen de la cámara.

A continuación se mostrará en la figura 6 un diagrama de flujo de proceso simplificado del proceso PEMTM y el cual puede ser modificado de acuerdo a diversas aplicaciones específicas.

Fig. 2.6 Diagrama simplificado del diagrama de proceso del sistema PETTM

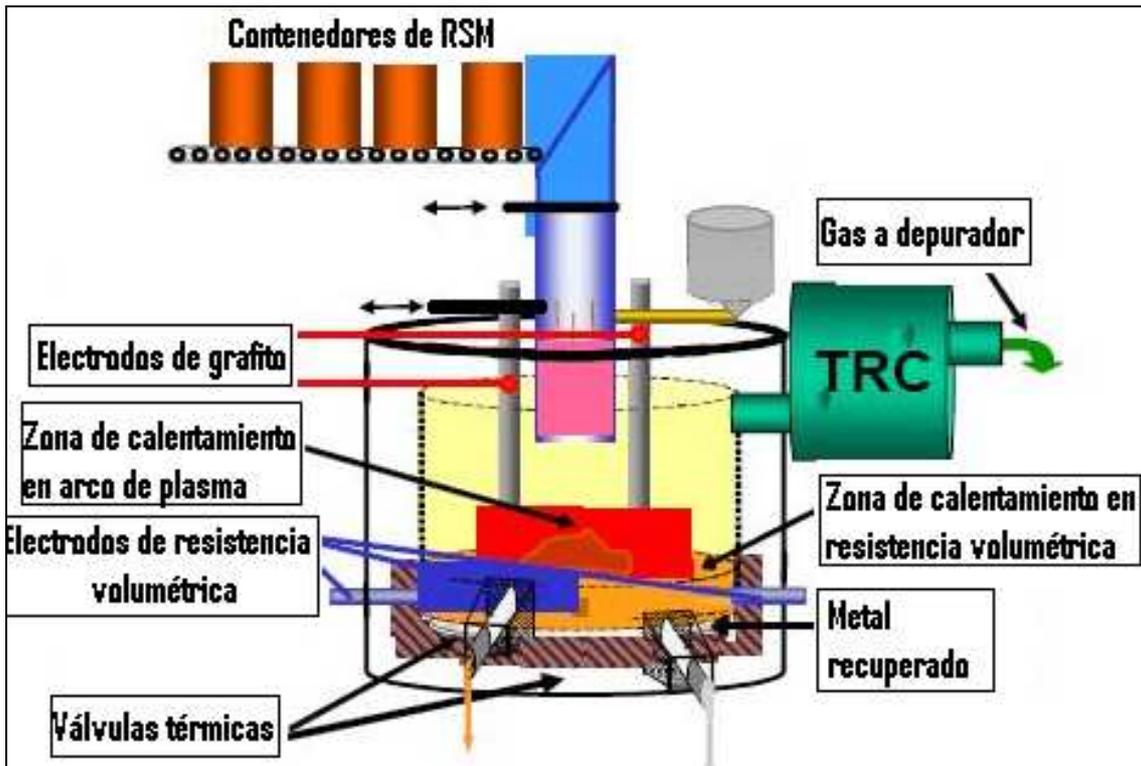


Fuente: Quapp, William J, *General Description of the PEMTM White paper*, Integrated Environmental Technologies, LLC, 2002.

2.3.2.2. Diseño básico del sistema PET™.

Un esquema del reactor de proceso PET™ es mostrado en la figura 7, donde contiene algunas de las principales partes que lo componen. Las partes principales serán descritas a continuación en esta sección.

Fig. 2.7 Reactor de proceso PET™



Fuente: Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 13, 2003.

2.3.2.3 Sistema de alimentación

El diseño del sistema de alimentación de residuos depende de la naturaleza y el tipo de residuos a ser tratados. Para los sistemas de desechos médicos, el sistema de alimentación de los residuos es más probable que sea diseñado de una manera para dar cabida a la introducción de residuos por paquetes. Los sistemas de procesamiento de residuos sólidos municipales pueden ser diseñados para el procesamiento de granel o embalado de residuos. IET trabaja en estrecha colaboración con las empresas que son altamente experimentados en el diseño y

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

construcción de sistemas de alimentación de residuos para asegurar que estos subconjuntos sean baratos, prácticos, funcionales y plenamente compatibles con los tipos de residuos a ser tratados y los sistemas PEMTM que se están instalando.

2.3.2.4 Reactor

El reactor está hecho de acero inoxidable y de un material refractario en donde la superficie exterior de éste se le hace pasar aire de enfriamiento y por la parte de abajo del reactor se le hace pasar agua de enfriamiento. El volumen generado en la parte superior de los residuos es de un tamaño tal para proporcionar un tiempo de residencia de dos segundos para los gases. La velocidad de los gases en esta región es baja y el arrastre de partículas es mínimo y opera a 1000°C aproximadamente. Hay ciertos materiales refractarios especializados que son de IET, cuyo diseño es formulado para dar más años de operación y así se eviten las operaciones de mantenimiento.

2.3.2.5 Sistema de electrodos de corriente directa (CD)

El plasma en un sistema PEMTM es creado usando un sistema de electrodos de grafito conectados a una fuente de alimentación de CD. Los electrodos de grafito conducen la corriente eléctrica a través del reactor para crear un arco de plasma en la parte inferior del contenedor de vidrio fundido. Por la alta temperatura creada por el plasma, los residuos y el vapor se hacen reaccionar para producir gases tales como CO, CO₂ y H₂. El nitrógeno es utilizado como un gas de purga para prevenir la introducción de aire indeseable.

2.3.2.6 Sistema de electrodos de corriente alterna (CA)

El PEMTM tiene una segunda fuente de energía para mantener uniformemente la temperatura del baño de vidrio. Mientras la fusión inicial de los materiales inorgánicos se produce en la región de plasma, el fundido del baño de vidrio disuelve estos componentes inorgánicos para formar una solución de óxido de materiales. Un conjunto de electrodos conectado a la red de suministro de energía se encuentra inmerso en el baño de vidrio fundido y mantiene la distribución de temperatura en el baño. Estos electrodos se insertan desde la parte lateral del reactor y están por debajo de la superficie de vidrio. Este uso de electrodos de CA

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

y las dos fuentes de energía simplifican el drenado del vidrio fundido cuando debe ser descargado del reactor.

Además, con ésta fuente de alimentación adicional, la energía que proporciona al baño de vidrio no tiene que venir sólo de la energía de CD comparación de la mayoría de los sistemas de antorcha de plasma. Esto permite que el sistema pueda estar en un modo automático y con menores requerimientos de energía y a su vez permita iniciar el procesamiento en un corto período de tiempo. En el caso de las antorchas de plasma, se tienen resultados de sobrecalentamiento y hay volatilización de vidrio.

2.3.2.7 Sistema de control de contaminación de aire

El diseño del control de contaminación de aire IET limpia las pequeñas trazas de partículas contenidas en la corriente de gas y asegura que el sistema tiene bajas emisiones dentro de las más estrictas regulaciones de EE.UU. según la Agencia de Protección Ambiental (APA).

En la figura 1 como se puede observar a la salida del reactor, el gas de síntesis se enfría rápidamente a un punto donde la temperatura esté por debajo de la formación de dioxinas. Luego el gas es enfriado a continuación y se filtra para eliminar cualquier partícula que haya sido arrastrado en la corriente de gas. A continuación de la filtración, el gas se enfría por debajo de su saturación y se pasa a través de un depurador para eliminar los gases ácidos que se podrían haber formado a partir de halógenos o de azufre en los residuos.

Tras el lavado, la humedad se elimina del gas en un eliminador de alta eficiencia y el gas se recalienta antes de ser pasado a través de un filtro de carbón y un banco de filtros HEPA¹⁹.

Si hay presencia de mercurio en el gas de síntesis sería necesario usar filtros de carbono activado impregnado de azufre o yoduro de potasio para eliminarlo. Hay aditivos que se le pueden agregar al filtrado para que se forme un compuesto sólido.

¹⁹ HEPA (High Efficiency Particulate Air). significa filtro de alta eficiencia para remover partículas en el aire. Este tipo de filtros está compuesto de diminutas fibras de vidrio, que tejidas, forman un papel muy tupido. De este modo se crea un filtro con un tamiz muy pequeño que permite capturar partículas diminutas. Una vez que las partículas contaminantes han atravesado el filtro no pueden volver de nuevo al aire. Consultado en <http://www.lux.es/lux-preguntas-aire-puro/filtro-hepa.html> el 17 de enero 2009.

2.3.2.8 Generador de energía.

Un generador típico del proceso PEM™ es el sistema que utiliza un motor de combustión pobre que ha sido seleccionado para cumplir las regulaciones referentes a las emisiones a la atmósfera de la localidad donde está instalado el sistema.

El generador puede ser de tal tamaño, ya sea para consumir el gas de síntesis o para proporcionar un exceso de energía mediante la mezcla del gas de síntesis con gas natural o gasóleo.

Una importante ventaja del sistema PEM™ es la pequeña cantidad de emisiones del gas. Como casi nada de aire se mezcla con el gas de síntesis en el proceso de gasificación PEM™, el gas de síntesis obtenido contiene una mínima cantidad de nitrógeno. Por ejemplo, algunas veces el conjunto de generadores usados con un Modelo 4 PEM™ (dos generadores 130 kW cada uno) tienen un tubo de escape de cerca de 3.7m de altura²⁰. La velocidad con la que salen los gases del tubo de escape es de 30.48m/s con una temperatura cercana a los 567° C. Para unidades de mayor tamaño, son usados un conjunto de generadores de mayor tamaño también para cubrir las necesidades de generación de energía de la planta. Si agua caliente puede ser utilizada en el sitio, adicionalmente más del 40% de la energía térmica puede ser recuperada para el generador térmico de RSM, lo cual nos da una reducción sustancial de costos.

2.3.3 Capacidad de procesamiento PEM™

Los sistemas del proceso PET™ pueden ser usados para cualquier corriente de alimentación pero puede ser necesario realizar estudios de tratabilidad para establecer parámetros de procesamiento para ciertas corrientes, las cuales no habían sido evaluadas previamente por IET. Los sistemas de plasma de PET™ dependen en gran medida de la energía que se debe suministrar por la corriente directa (CD) para gasificar los RSM. Se sabe que a mayor proporción de materia

²⁰ Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 2003.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

orgánica contenida en los RSM, se requiere mayor energía que cuando se tiene mayor proporción de materia inorgánica.

De cualquier forma el sistema es versátil, ya que se puede tratar una extensa variedad de materiales con ciertos cambios a la velocidad con la que se suministra la alimentación.

IET ha construido y operado unidades PEM™ con capacidades de procesamiento de 0.5, 2,4 y 10 toneladas por día. Las escalas de procesamiento comerciales más comunes son las de 4 y 10 ton/día como es el caso de una instalación de IET ubicada en el edo. De Washington que actualmente trata diversos desechos nucleares que contienen contaminantes químicos peligrosos.

IET además ofrece 2 tamaños del sistema IET, que son los modelos 4 y 10.

Para que se pueda visualizar el tamaño de las instalaciones, se darán a conocer las medidas de ambos modelos.

Para el caso del modelo 4 se tiene que las dimensiones de las instalaciones son de 24m por 30 m, que está ubicada en Hawai. El modelo10 se ha instalado en Japón y las medidas respectivas son de 18 m por 25m.

A continuación se enlistarán plantas de IET que se han comercializado en diversas partes del mundo²¹:

Allied Technology Group, Inc.'s (ATG). Planta de tratamiento de residuos mezclados ubicada en Richland, WA en donde es utilizado el sistema G200 PEM™ para el tratamiento de una combinación de residuos peligrosos y radiactivos, los cuales son materiales difíciles de procesar en el mundo. (La instalación está en modo de espera).

Asia Pacific Environmental Technologies (APET). La instalación de *Asia Pacific Environmental Technology's (APET)* llamada Vitrificación Médica de Hawai (VMH) localizada en Honolulu, HI usa el sistema G100 PEM™ para tratar residuos procedentes de hospitales y otros tipos de residuos médicos del área de Honolulu,

²¹ Consultado en la página principal de Integrated Environmental Technologies (IET) www.inentec.com el 17 de enero de 2009.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

destruyendo todo tipo de patógenos y materiales con riesgo biológico, generando electricidad proveniente del gas de síntesis.

Fuji Kaihatsu.

El sistema G300 PEM™ fue colocado en la instalación Fuji Kaihatsu's ubicada en Iizuka, Japón (cerca de Fukuoka). El sistema fue diseñado para procesar cantidades mayores a las 10 toneladas por día (/t/d) de plásticos y residuos industriales, que son transformados en electricidad con un bajo nivel de contaminación ya que es un proceso no incinerativo.

Planta demostrativa para tratamiento de residuos de policloruro de vinilo (PCB). Este sistema G100 fue instalada en la Universidad de Ryukyus en la isla Okinawa de Japón por las industrias pesadas Kawasaki (una de las instalaciones IET más representativas en Japón). Fue usado para demostrar a las Autoridades Regulatorias de Japón que el PEM™ pudo procesar de manera segura PCBs y cumplir con los requisitos de destrucción Japonesas.

Planta piloto de procesamiento de asbestos de la Industria Pesada Kawasaki. En 2006, Kawasaki movió e instaló el sistema G100 en Harima, Japón para una demostración referente a la destrucción de asbestos. Esta prueba fue exitosamente completada en Junio de 2006. El sistema será movido a la instalación KHI cerca de Osaka, Japón, y reinstalado para la destrucción de PCB sobre una base continua.

Global Plasma en Taiwan Global Plasma de Taipei, Taiwan instaló un sistema G100 para el tratamiento de residuos médicos y baterías. El comisionamiento de la planta fue completado en Marzo del 2005. El sistema pasó la prueba de desempeño EPA para emisiones al ambiente en Taiwan. Este es el primer sistema que usa un motor que puede funcionar con uno u otro combustible como el diesel para la combustión del gas de síntesis. Para la generación de energía utiliza un sistema de reducción catalítica selectiva con inyección de urea para la reducción del NOx y una oxidación catalítica para el control de CO.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

BioPure Systems en Malasia. Un sistema PEMTM con capacidad de procesar una tonelada por día está siendo instalada por representantes de IET en BioPure Systems en Kuala Lumpur, Malasia. Este será usado como una planta piloto para la realización de diversas pruebas para el mercado de Malasia.

2.3.3.1 Diseño modular

El proceso PEMTM está diseñado para tener una configuración modular. Todas las unidades del Modelo 4 están compuestas de módulos que son transportados por vía marítima hasta el lugar de su ubicación, lo cual hace una instalación rápida. Para las unidades del Modelo 10, debido a su gran tamaño se necesita un lugar más amplio para su instalación.

El sistema del proceso PETTM puede ser configurado para tener muchas unidades en un cierto sitio para así evitar pérdidas de las capacidades de procesamiento durante los períodos de mantenimiento. Cada unidad PETTM tiene su propio sistema de limpieza de gases. También el diseño de un sistema de muchas unidades puede estar acoplado para compartir el mismo sistema de equipos de alimentación como los trituradores. De igual forma, para la generación de energía, el gas de síntesis proveniente de múltiples unidades de PETTM puede ser dirigido a un banco de uno o más generadores de energía.

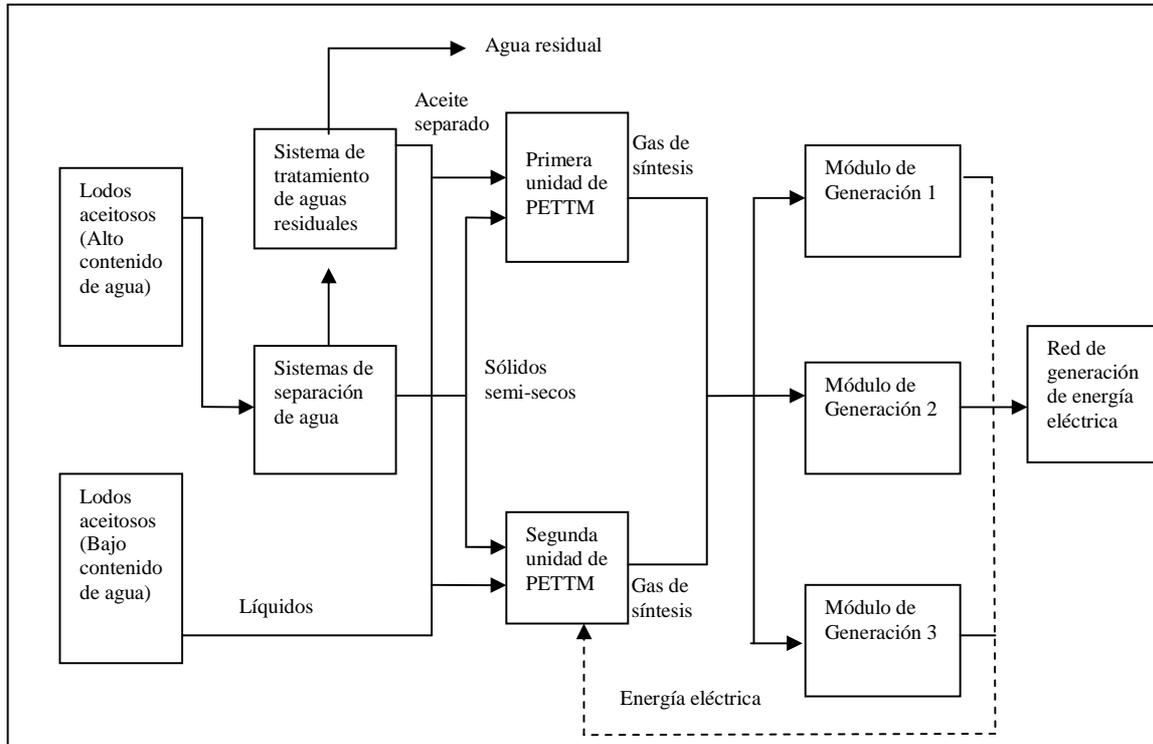
2.3.3.2 Módulo opcional para el tratamiento de aguas residuales.

Mientras el proceso PEMTM puede aceptar cantidades significativas de agua en la alimentación, en donde gran parte desplazará el vapor usado en la reacción de reformación y el sistema de plasma no debe ser considerado como una alternativa en una planta de tratamiento de aguas residuales. Si se necesita más cantidad de agua que la requerida para la formación del gas de síntesis a partir de los RSM, la energía suministrada por el plasma será utilizada como si lo fuera una caldera. En caso de contar con una corriente de alimentación de RSM con un alto contenido de agua, se debe evaluar la posibilidad de instalar un sistema de separación previo al sistema PEMTM para determinar los costos de su efectividad contra el uso del sistema PEMTM por sí sólo.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

A continuación se mostrará en la figura 8 una aplicación de este módulo para el tratamiento de agua contaminada proveniente de lodos aceitosos.

Fig. 2.8 Ejemplo de la modularidad de un sistema PET™ para aplicación de lodos aceitosos.



Fuente: Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 13, 2003.

En la figura anterior podemos observar que el proceso cuenta con un módulo previo a las unidades de PET™ que retira el agua de los lodos aceitosos con la finalidad de consumir menor energía en las antorchas de plasma y a su vez tener una mayor obtención y recuperación de energía eléctrica.

2.3.3.3 Requerimientos de energía.

Los requerimientos de energía para la operación del sistema PEM™ varía entre 750 y 3000kWh/ ton²². La cantidad de energía a utilizar está en función de:

- La escalas de procesamiento. A mayor tamaño son más eficientes en el uso de la energía a comparación de las instalaciones pequeñas.

²² Fuente: Quapp, William J, *General Description of the PEM™ White paper*, Integrated Environmental Technologies, LLC, 2002.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

- Una composición de RSM precisa. Cada corriente de RSM debe estar bien definida para establecer un buen estimado de los requerimientos de energía necesarios para gasificar los residuos. La materia inorgánica presente en los RSM requieren por lo general el uso de menos energía, pero se produce una menor cantidad de gas de síntesis. Los componentes orgánicos complejos requieren mayor energía y se contrasta con la producción de un alto contenido de energía que tendrá el gas de síntesis. El agua será necesaria para llevar a cabo la reacción de reformación de vapor, pero un exceso de agua nos ocasiona consumo de energía.

2.3.4 Características del sistema PET™

En el sistema PET™ es muy importante considerar ciertas características que la describen como las siguientes:

- Eficiencia de energía y fiabilidad de electrodos.
- Adaptabilidad y costos del sistema.

2.3.4.1 Eficiencia de energía y fiabilidad de electrodos.

El sistema PET™ requiere el uso de electrodos de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA) y no necesitan agua de enfriamiento. La eficiencia de eléctrica de este sistema está cercana al 98%. Las pérdidas en la AC se deben a la impedancia perdida en los transformadores. Por consiguiente favorece en gran medida las antorchas de plasma que tienen un rango de eficiencia de 60% debido a las pérdidas ocasionadas por el agua de enfriamiento en la antorcha. Los fundidores de crisol reportan de 25 a 35% de eficiencia eléctrica²³.

Comparando el sistema PET™ con las antorchas de plasma, éstas últimas sufren debido a la alta temperatura una corrosión en la porción del electrodo de cobre de la antorcha y hay subsecuentes fugas en el sistema de agua de enfriamiento dentro de la cámara de proceso. Muchas fugas en la superficie caliente del vidrio fundido ocasionan perturbaciones en las reacciones químicas. Comúnmente en

²³ Fuente: Quapp, William J, *General Description of the PEM™ White paper*, Integrated Environmental Technologies, LLC, 2002.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

los electrodos se obtienen de 24 a 100 horas de vida cuando realmente e deberían obtener alrededor de 200 horas.

2.3.4.2 Adaptabilidad y costos del proceso.

Cada sistema PETTM puede ser adaptado a la cantidad y naturaleza de la alimentación, el cual puede estar por encima del límite de diseño. Nuevos diseños basados en el escalamiento de diseños existentes pueden ser también desarrollados para cumplir con los requerimientos del cliente. Un nuevo diseño conceptual para el tratamiento de RSM está contemplando que la alimentación será distribuida a lo largo del fundidor para tener una buena gasificación con el reformado de vapor.

En este sistema los electrodos AC entrarán en la parte lateral, mientras que los electrodos DC estarán encima. IET confía en que pueda ser adaptado el diseño PETTM a una extensa variedad de requerimientos de alimentación. Se está realizando las pruebas con las capacidades de 2, 4 y 10 ton/ día. Se espera también ser implementado para las grandes capacidades de procesamiento de 25 y 50ton/ día.

El costo del sistema PETTM es dependiente del tamaño y la corriente específica de RSM. De igual manera, el costo de instalación está en función del tipo de infraestructura disponible en el sitio. Para IET, el orden de magnitud del costo la instalación del modelo 4 del sistema PETTM es menor a los 5 millones de dólares. El costo del modelo 10 es menor a los 10 millones de dólares.

2.3.5 Efluentes del sistema y reciclaje de vidrio

Además del gas de síntesis, el cual es mandado al generador, el proceso PETTM tiene otros subproductos como son:

- Vidrio
- Filtro colector de polvos
- Soluciones provenientes de la depuración del gas

2.3.5.1 Vidrio.

El vidrio puede ser desechado de cualquier forma o reciclado en un producto. En las capacidades de procesamiento de menor tamaño (Modelo 4) el vidrio debe ser

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

desechado si la cantidad es muy pequeña ya que justifica los costos asociados al reciclaje. La forma de eliminar los desechos dependerá de las regulaciones locales donde se encuentre la instalación.

Para grandes capacidades de procesamiento, en el proceso el vidrio obtenido se recicla en numerosos productos. Algunos de estos productos son desarrollados por IET como el EGRIT™, el cual es utilizado para remover óxidos, sarro o pintura de un metal. Si se agregaran aditivos se pueden obtener una alta calidad de EGRIT. La composición del vidrio puede ser modificada usando aditivos PET™ para obtener una alta calidad de EGRIT. A continuación las características comunes del EGRIT serán mostradas en la tabla 5.

Tabla 2.6 Características de material EGRIT™

Color	Varía de gris a verde oscuro dependiendo el rango del tamaño de la partícula
Dureza	6-7 Mohs
Forma	90% en forma de bloque o piramidal
Olor	Ninguno
Sílice libre	Totalmente vitrificado con sílice libre no detectable
Reciclable	Puede ser reutilizado y cuando es cortado es ralentizado, puede ser refundido y un nuevo material producido
Densidad	$2.6 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$ o 163lb/ft^3

Fuente: Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 13, 2003.

2.3.5.2 Filtro colector de polvos.

El polvo es generalmente una combinación de carbón sin reaccionar y polvos inorgánicos. IET puede instalar sistemas de recirculación de los filtros colectores hacia el fundidor. Esto es hecho para asegurar que los residuos de carbón reaccionen totalmente y los polvos inorgánicos sean enviados al fundidor y eventualmente incorporados al vidrio.

Temporalmente, se cuantifican los materiales volátiles acumulados en el filtro colector de polvos, este polvo debe ser desechado de acuerdo a la regulación local referente a la composición que presente y también depende de su ubicación.

2.3.5.3 Soluciones provenientes de la depuración del gas

La solución proveniente de la depuración del gas es una mezcla diluida que trae agua y sales principalmente. Las opciones de desecho dependerán de la localización y de la disponibilidad de plantas de tratamiento de aguas residuales. Las sales son producidas por la neutralización de los gases ácidos que provienen de la destrucción de los residuos. Éstos son producidos por los radicales halógenos y el sulfuro contenidos en la corriente de residuos.

La cantidad final obtenida es proporcional al contenido en la corriente de alimentación de residuos. En general, la fracción masa de estas sales es menor al 5% que la misma alimentación. Una opción para el desecho de los residuos no tóxicos podría ser enviarlos al drenaje y para condiciones más exigentes puede ser necesario que se trataran en una planta de tratamiento de aguas residuales que separe las sales de agua.

2.4 Tecnología *TwinRec* de Ebara.

2.4.1 Antecedentes *Ebara Corporation*.

Ebara Corporation fue fundada en 1912 y es uno de los principales proveedores de sistemas de ingeniería del medio ambiente y se enfoca en la realización de “una tecnología sustentable y sostenible. Actualmente, esta corporación provee de tecnologías para el tratamiento de aguas y de RSM a los clientes alrededor del mundo, y está trabajando activamente en el desarrollo de tecnologías de próxima generación²⁴.

Otras actividades comerciales que la corporación abarca son el manejo de equipos para fluidos, maquinaria de precisión y nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la energía, incluyendo los generadores de energía eólica, sistemas de cogeneración a base de celdas de combustible y generadores de energía fotovoltaica.

EBARA ha establecido objetivos ambiciosos para el desarrollo de una nueva generación de tecnologías de tratamiento de RSM. Además de los objetivos comunes en cuanto al tratamiento térmico de residuos, se han aplicado más actividades como las siguientes en el proceso:

- Mejora de la recuperación de metales para el reciclaje.
- Vitrificación de las cenizas para su uso como materiales de construcción.
- En general la reducción al mínimo del vertido de residuos secundarios.
- Flexibilidad para tratar los diversos desechos sólidos y líquidos.
- Evitar el consumo de combustibles fósiles y de oxígeno para lograr estos objetivos.

La combinación de la presión atmosférica con la baja temperatura a la que se lleva la gasificación por lecho fluidizado y con un alta temperatura de fusión de las cenizas es la clave de la nueva tecnología que ha desarrollado, que ahora se conoce como *TwinRec*.

²⁴ Ebara Corporation, Zurich Branch, *Media Information Release*, April 2004.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Tras dos generaciones de plantas piloto, la primera planta comercial comenzó a funcionar a principios del año 2000. Ahora, cuatro años más tarde, 20 líneas de proceso TwinRec están en funcionamiento y se ejecutan en una variedad de residuos sólidos municipales e industriales.

2.4.1.1 De incineración a gasificación.

La quema controlada en masa de los RSM se introdujo en el último trimestre del siglo 19, cuando el objetivo principal era luchar contra la propagación del cólera y otras enfermedades en las ciudades con crecimiento.

En las décadas siguientes, los beneficios adicionales de la incineración de residuos fueron descubiertos y se aplicaba cada vez más, en particular en la reducción de las necesidades de espacio de rellenos y en la recuperación de energía. En las últimas décadas, mucho se centraba en las emisiones a la atmósfera, que se tradujo no sólo en la adición de potentes y costosos equipos de tratamiento de gas y también en mejoras sustanciales del proceso de incineración en sí; para ejemplo la mejora de burn-out de los residuos, se señalan: las emisiones de CO, la destrucción de dioxinas y la reducción de NOx.

En la década de los 90, en forma gradual nuevas mejoras se han implementado a las tecnologías de incineración de lecho fluidizado (para los pequeños partículas de residuos) y de hornos rotatorios (para residuos peligrosos).

2.4.2 Descripción del proceso TwinRec

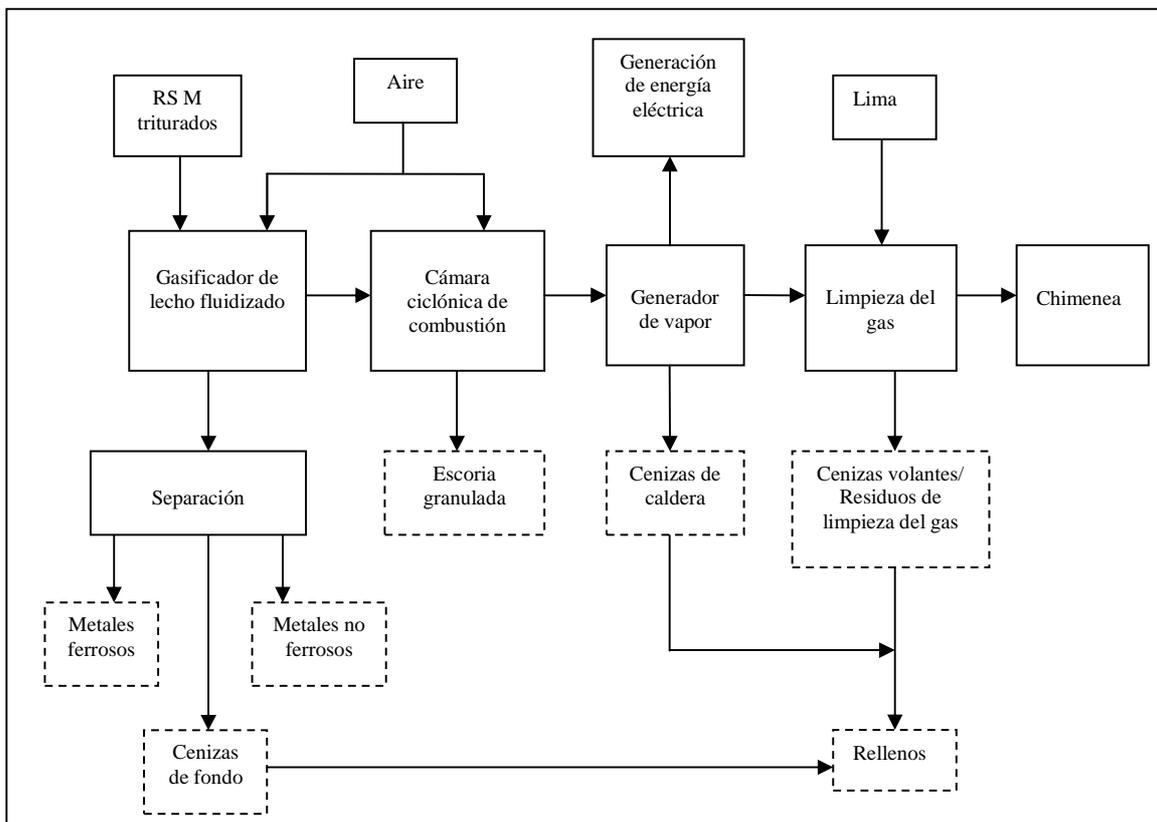
La siguiente descripción se centra en los componentes básicos del sistema TwinRec: El gasificador de lecho fluidizado y la cámara de combustión ciclónica.

La función principal del gasificador es separar la porción del combustible obtenido y el polvo proveniente de partículas metálicas e inertes de la trituradora de polvo. A partir de este paso, una mezcla de partículas inertes y metálicas son producidas, que es mucho mejor para una separación mecánica de los metales que cuando salieron de la trituradora de polvo; la energía es transferida a la segunda fase, donde se utiliza para la vitrificación de finas cenizas y para la producción de energía.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

El tipo de gasificador es uno de lecho fluidizado de circulación interna de tamaño compacto, al cual se le suministra la cantidad de aire adecuada para promover un rápido y turbulento mezclado del combustible con el lecho operando a temperaturas entre 500 - 600 °C. Junto con el gas del combustible resultante, las partículas finas dejan el gasificador y son arrastradas a través del flujo de gas. La baja temperatura de la gasificación en el lecho fluidizado permite un fácil control de las condiciones del proceso. En la figura siguiente se muestra un diagrama simplificado del proceso TwinRec.

Figura 2.9 Diagrama de flujo simplificado del proceso TwinRec



Fuente: W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, sin fecha.

Los metales como el aluminio, cobre y hierro pueden ser reciclados como productos valiosos de la corriente de salida de la parte inferior del gasificador, ya que no son ni oxidados ni sinterizados con otros componentes de la ceniza. Junto con estos metales, las partículas largas inertes son removidas. Las partículas

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

pequeñas regresan al gasificador que sirven como material de lecho. Un beneficio adicional para la separación del metal es que todas las partículas más finas son sopladas fuera del gasificador y que es integrado en el slag, dejando las partículas metálicas valiosas aprox. > 0.5 mm para su reciclado.

El gas de síntesis y las partículas de carbón, ambos producidos en el gasificador, se queman junto a la cámara de combustión ciclónica a temperaturas entre 1350 - 1450°C mediante la adición de aire secundario para asegurar su completa oxidación. Aquí partículas inertes finas y metálicas son fundidas que están integradas dentro del slag, sin ninguna necesidad adicional de energía.

El slag fundido es enfriado en un baño de agua para formar un granulado con excelente resistencia al lixiviado, que cumple con todos los reglamentos comunes de seguridad para su reciclado en la construcción, como las normas alemanas LAGA Z2²⁵.

La alta temperatura de combustión nos garantiza que se cumple con las normas más estrictas de emisión de dioxinas por debajo de 0,1 ng TE/Nm³ y que por lo tanto, hay medidas mínimas para el control de contaminación.

Los gases calientes resultantes de la cámara de combustión del proceso son luego transferidos a un generador de vapor convencional que nos pueda generar energía eléctrica. Los gases una vez enfriados son enviados a un sistema de limpieza para después ser descargados a la atmósfera. Las cenizas provenientes del generador de vapor y los residuos sólidos del sistema de limpieza de los gases son enviadas a un relleno, ya que no causan un efecto dañino al medio ambiente.

Debido a la baja relación de exceso de aire, sólo un tamaño compacto generador de vapor y una unidad de control de contaminación de aire son requeridos. El contenido energético de los desechos se convierte en electricidad y / o calentamiento con alta eficiencia neta. El zinc y otros metales volátiles son transferidos a las cenizas ricas en zinc, en un filtro de cenizas enriquecidas de zinc, los cuales pueden reciclarse para la industria de zinc²⁶.

²⁵ LAGAZ2: Sn normas alemanas que establecen los límites permisibles de emisiones de ciertos contaminantes, así como regula los lixiviados de todo tipo de residuo sólido.

²⁶ Ebara Corporation, Zurich Branch ,A. Selinger, Ch. Steiner and K. Shin, *TwinRec Gasification and Ash Melting Technology –Now also established for Municipal Waste*,2003.

2.4.3 Características del equipo de proceso.

TwinRec comprende como se había dicho anteriormente un gasificador de lecho fluidizado y una cámara de proceso ciclónica.

Gasificador de lecho fluidizado

- Utiliza relativamente baja proporción de aire para disminuir la velocidad de reacción de gasificación, por lo tanto, llevar el control de la temperatura del lecho fluidizado y homogenizar el gas generado.
- Un gasificador puede recibir una carga de lecho de 2 a 3 veces mayor en comparación con un incinerador, por lo que la zona del lecho puede reducirse a la mitad.
- Debido a una baja temperatura cercana a 580°C en el lecho fluidizado existe una atmósfera reductora, por lo tanto metales no oxidados como el aluminio y el hierro pueden ser recuperados de manera limpia y en una muy valiosa condición.
- Materiales no combustibles tales como los residuos obtenidos del gasificador son aplastados y los tamaños de partículas obtenidos junto con una alimentación adecuada al combustor circular genera escoria, la cual puede ser reutilizada.

Cámara de combustión ciclónica.

- Como el sistema no requiere de combustibles secundarios tales como combustible fósil y los RSM se funden a través de una reacción exotérmica, se genera menos monóxido de carbono.
- En comparación con métodos convencionales de incineración, la cámara de combustión ciclónica reduce drásticamente la generación de dioxinas, en virtud de la combustión a alta temperatura (1300 ° C a 1400 ° C)
- Dado que la ceniza se convierte en escoria por la alta temperatura de combustión y cumple con las normas nacionales relativas a la fusión y solidificación, la escoria se puede utilizar como pavimento y como material de construcción y a su vez, como una alternativa para sustituir a la grava.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

- Las escorias son descargadas de forma automática y continua en pequeñas cantidades, evitando el peligro de una descarga manual por un operador.

2.4.4 Desempeño ambiental.

En lo que se refiere al desempeño ambiental del proceso TwinRec se mencionarán a continuación aspectos relevantes que deben ser tomados en cuenta.

2.4.4.1 Emisiones del proceso

La escoria granulada cumple con todos los estándares de lixiviabilidad común. La temperatura alta de la combustión, en combinación con la limpieza de gas (es decir, del NOx), permite el cumplimiento de la mayoría de las más estrictas normas sobre emisiones de dioxinas de hasta 0.1 (ng TEQ/Nm³) con un patrón mínimo de mediciones adicionales²⁷.

A partir de 1000 kg de una mezcla de residuos triturados de automóvil (RTA) y de lodos depurados (relación 7:3), se obtienen 47 kg de cenizas de la caldera y los residuos provenientes del control de la contaminación atmosférica (CCA) deben ser depositados en vertederos. En la limpieza del gas seco con RTA no se cumplen con las normativas sobre emisiones de HBr, HCl, y Br₂.

En las plantas de Europa se instalan sistemas de depuración húmeda para cumplir completamente la regulación de emisiones.

2.4.4.2 Resultados del reciclado y la recuperación

En cuanto a la amplia gama de componentes de todos los residuos aptos para TwinRec, el proceso genera flujos de productos que se ajusten a sus características y permiten el mejor uso posible de ellos:

- Metales y aleaciones puros se recuperan en calidad superior del gasificador y se reciclan.
- Materia mineral inerte es limpiado del polvo y la materia orgánica para que se obtenga un reciclaje adecuado.
- Polvo mineral y óxido metálico en polvo son vitrificados en el vidrio granulado y son reciclados después.

²⁷ ng TEQ/Nm³ significa nanogramos de equivalentes tóxicos (es la suma total de concentraciones de cada uno de los componentes de las dioxinas y furanos) por metro cúbico normal de gas.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

- Cualquier sustancia orgánica nociva será casi completamente destruida y el contenido orgánico total es transformado en energía.
- Sales de metales volátiles se concentran en las cenizas secundarias volantes y las cuales están disponibles para el reciclado del zinc, el plomo y el cobre en la industria del zinc.
- La cantidad final de residuos de los vertederos se puede reducir como sea necesario a partir de los objetivos ecológicos y económicos planteados, a valores todavía no conocidos en la industria.

La eficiencia energética del proceso TwinRec a comparación de los procesos de tratamiento térmico de residuos no requieren de tanto oxígeno y por tanto, no consumen una buena parte de la energía internamente. Además, la fusión de las cenizas en el horno está integrado con el ciclo de vapor, haciendo uso del más alto nivel de temperatura alcanzado en la producción de vapor.

2.4.4.3 Reciclado del vidrio granulado.

El vidrio granulado es la fracción más grande destinada al reciclaje. Para una aplicación exitosa en la industria de la construcción, deben de cumplir los respectivos criterios técnicos y aprobar la certificación del medio ambiente.

Técnicamente, el granulado califica para diversas aplicaciones, en sustitución de la grava o arena. Puede ser aplicado como material a granel suelto o como relleno en combinación con compuestos inorgánicos u orgánicos aglutinantes. En Japón, el granulado se utiliza como relleno en el asfalto.

La principal prueba ambiental suele ser un procedimiento de lixiviación, con requisitos específicos de las concentraciones máximas de los lixiviados. La armonización de estos procedimientos de lixiviación entre los países de la Unión Europea(UE) o incluso internacionalmente se encuentra todavía en una fase muy temprana. Como resultado de ello, diferentes conjuntos de normas se aplican en cada país.

Afortunadamente, el vidrio granulado TwinRec ha demostrado cumplir fácilmente con todo tipo de pruebas de lixiviados en diversos países:

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Alemania

Además de la regulación individual en cada una de las partes de Alemania, el reciclado de materiales de desecho en construcción está sujeta al cumplimiento de LAGA Z2. El lixiviado del vidrio granulado TwinRec(original o después de la molienda) tiene una detección baja en el límite para los metales y halógenos.

Países Bajos

Una vez más, la mayoría de los parámetros están por debajo de los límites de detección para el vidrio granulado TwinRec o en una pequeña fracción de los límites de la categoría N2²⁸.

Japón

La prueba de lixiviación japonesa es similar a la alemana, pero el material es puesto bajo tierra. Todos los parámetros se encuentran por debajo de límite de detección. El vidrio granulado TwinRec es ya reciclado en grandes cantidades por la industria de la construcción.

Suiza.

En Suiza al reciclado proveniente del tratamiento de residuos en general no le dan mucha importancia y en lugar de ello, se anuncia una categoría de vertedero especial de bajo costo para la alta calidad en los granulados de vidrio. Un amplio estudio fue patrocinado por la Agencia Suiza para el Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje (ASMBP) para investigar el comportamiento a largo plazo de estos materiales de vidrio. El vidrio estaba previsto este estudio y el resultado fue, que el vidrio (como otros) tiene excelentes propiedades para un seguro y largo plazo de almacenamiento.

2.4.5 Experiencia de Ebara

La planta de Aomori que trata residuos triturados de automóvil está en operación comercial desde el año 2000. La planta Aomori tiene una capacidad térmica de 2 x

²⁸ Las normas Z2 fueron expedidas los Países Bajos para establecer los límites permisibles en cuanto al lixiviado de todo tipo de residuo sólido.

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

40 MW, correspondiente a 2 x 60,000 toneladas por año²⁹. Estos residuos de automóvil se entregan a partir de 5 de plantas de trituración y 2 plantas de separación de metales no-ferrosos. Todos los residuos de la fragmentación son alimentados a un gasificador sin tratamiento previo.

A partir de la operación de la planta Aomori se comenzaron a construir más plantas, las cuales son mostradas en la tabla más adelante.

Hay que resaltar que el 7 de febrero de 2003, EBARA anunció que había adquirido un proyecto de gran envergadura contra la competencia internacional:

El Ministerio de Vivienda y Gobierno Local de Malasia decidió que la tecnología TwinRec de EBARA instalara la primera planta de tratamiento térmico de RSM del país.

La planta, que se encuentra en Kuala Lumpur, tiene una capacidad total de 1,500 ton / d (62.5 t / h) de RSM en 5 líneas de proceso de 300 ton / d cada uno.

Es considerada por el momento una de las plantas con mayor capacidad del mundo en lo que se refiere a la gasificación de residuos y fusión de cenizas³⁰.

A continuación en la siguiente tabla se mostrarán la localización de las plantas más importantes con las que cuenta la tecnología TwinRec de Ebara.

²⁹ W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, sin fecha.

³⁰ EBARA Corporation, Zurich Branch ,A. Selinger, Ch. Steiner and K. Shin, *TwinRec Gasification and Ash Melting Technology –Now also established for Municipal Waste*,2003

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Tabla 2.7 Plantas diversas con tecnología TwinRec de Ebara

Localización	Año de arranque	Tipo de residuos tratados	Capacidad			Capacidad térmica	Observaciones
			% masa	Flujo másico (ton/día)	LHV (MJ/kg)		
SODEGAURA, JP Planta piloto EBARA	Nov. 95	RSM,RDF, desechos plásticos, residuos triturados de automóvil (RTA)	Diversa	7	Diversa	1.5	Operación 11/95-5/97
FUJISAWA, JP Planta piloto EBARA	Jul. 97	RSM,RDF, desechos plásticos, residuos triturados de automóvil (RTA)	Diversa	24	Diversa	4.8	Operación 7/97- 2001 Incl. 100 días continuos de operación 9/12/97
AOMORI, JP Aomori Renewable Energy Recycling Corp	Feb. 2000	Residuos triturados de automóvil (RTA), lodos de aguas residuales	67 33	2 x 225	14.3	2 x 40	
JOETSU CITY, JP Centro de tratamiento de lodos	Mar. 2000	Lodos secos, desechos plásticos	68 32	15.7	12.3	2.2	
KUROBE, JP Nippon Mining & Metals Co.	Dic. 2000	RTA Desechos plásticos Escorias de cobre + sorbentes	41 13 46	63	10.2	7.4	
SAKATA AREA, JP Clean Union	Mar. 2002	RSM	100	2 x 98	10.9	2 x 12.3	
KAWAGUCHI, JP Oficina Municipal	Nov. 2002	RSM	100	3 x 140	13.0	3 x 21.0	
UBE CITY, JP	Nov. 2002	RSM	100	3 x 66	12.5	3 x 9.5	
CHUNO UNION, JP	Mar. 2003	RSM	100	3 x 56	11.3	3 x 7.3	
MINAMI- SHINSHU WIDE AREA UNION, JP	Mar. 2003	RSM	100	2 x 46.5	8.4	2 x 4.5	
Nagareyama City, JP	Feb. 2004	RSM	100	3 x 69	11.7	3 x 9.3	
Tokyo Rinkai Corp., JP	Agosto 2006	Residuos industriales (varios)	100	2 x 275	13.0	2 x 41.4	
Hino City, JP Shiga Central Area Clean Union	Abril 2007	RSM	100	3 x 60	7.5	3 x 5.2	
Capacidad total				2580		371	

Fuente: W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, sin fecha.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó una descripción de cada una de las tecnologías involucradas en este trabajo, resaltando ciertos aspectos claves que nos serán de gran utilidad más adelante para hacer una comparación entre estas tecnologías. Hay que mencionar que de una gran gama de tecnologías térmicas que existían, se seleccionaron las cuatro tecnologías que se analizaron en este capítulo a partir de criterios preliminares como experiencia en sus procesos, eficiencia térmica, las escalas de procesamiento y también la flexibilidad que tienen para tratar los distintos tipos de residuos entre los que se incluyen los RSM, que son los de nuestro interés.

De las tecnologías estudiadas Ebara es la que cuenta con mayor capacidad de procesamiento y eso de cierta manera representa un aspecto que puede implementada en regiones donde se cuente con una gran producción de RSM. En cuanto a la flexibilidad de alimentación, la tecnologías de plasma ofrecen una ventaja ya que no se necesita una selección previa de los RSM, pero es una tecnología costosa que lleva poco tiempo en el mercado, pero que ofrece un potencial enorme por la innovación tecnológica para tratar los RSM y tener un desempeño ambiental aceptable.

A partir de este análisis se pretenden tomar aspectos como los mencionados anteriormente que nos conduzcan a tomar una serie de ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías estudiadas y así llevar a cabo la comparación respectiva.

De este modo se podrá llevar a cabo la selección de la tecnología más adecuada que nos pueda resolver la problemática relacionada con la administración y eliminación de los residuos sólidos municipales.

A continuación se mostrará en la tabla siguiente un cuadro comparativo de las tecnologías estudiadas:

Capítulo 2. Análisis de las tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM

Datos	Gasificación por plasma		Gasificación convencional	
	Solena Group	Integrated Environmental Technologies	Nippon Steel	Ebara
Capacidad mínima	43,800-87,600 ton/año	182.5 ton/año	3,650 ton/año	26,280 ton/año
Capacidad máxima	131,400-175200 ton/año	3,650 ton/año	189,800 ton/año	547,500 ton/año
Alimentación	Biomasa, RSM, coque, residuos finos	RSM, residuos peligrosos y residuos médicos por mencionar algunos	RSM, lodos depurados, residuos industriales	RSM, lodos depurados, desechos semilíquidos.
Pretratamiento	Trituración, desmenuzamiento y compactación de RSM	Compactación de RSM	Se requiere homogenización a un tamaño de partícula deseado por medio de trituración	Se debe reducir los residuos a 300mm en tamaño
Temperatura del reactor	5000°C	5000-6000°C	300-1000°C	500-600°C
Presión	Presión atm	NR	NR	Presión atm
Catalizador	Coke, cal y aire enriquecido con oxígeno	Aire	Coke, piedra de cal y aire enriquecido con oxígeno	Aire enriquecido con oxígeno

NR: Son los datos que no han sido reportados.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información consultada en folletos y artículos en Internet.

Capítulo 3
Bonos de carbono

En este capítulo se abordará un tema que ha cobrado importancia en los últimos años y que tiene como objetivo resolver la problemática ambiental que de no atenderse podría desencadenar fenómenos que en un futuro serían difíciles de contrarrestar como el aumento del nivel del mar debido al derretimiento de los glaciares en los polos árticos.

Los bonos de carbono son por el momento, una de las maneras por las que se pretende disminuir la contribución de los gases de efecto invernadero y a su vez que la tecnología más conveniente para nuestro país en el tratamiento de RSM incorpore todos estos factores para aún ser más competitiva en el mercado. Entre otros puntos, se tocarán puntos como la cartera de proyectos que se tienen en México y como está estructurado el mercado global para saber quienes pueden ser nuestros clientes potenciales en la compra de los bonos de carbono.

3.1 Efecto Invernadero y Consecuencias del Calentamiento Global

De un modo natural la fuerza de gravedad de la Tierra retiene en su superficie el aire y el agua de mar, elementos vitales para nuestra existencia. Pero también la vida requiere de una fuente constante de calor para la atmósfera, fuente que surge de la superficie del suelo cuando es calentada por la radiación solar. Una parte de ese calor se queda en el planeta y la otra vuelve al espacio. El calor que emana cuando la luz solar llega a la superficie contrasta con las bajas temperaturas de las altas capas de la atmósfera, las cuales se enfrían continuamente por la constante pérdida de energía¹.

El efecto invernadero se produce cuando parte de la radiación solar de onda corta que ingresa libremente a nuestro planeta y que rebota en la superficie, dirigiéndose hacia el espacio exterior en longitudes de onda correspondientes a los rayos infrarrojos, es reflejada de vuelta por las nubes y ciertos gases presentes

¹ Definición extraída de la enciclopedia libre Wikipedia (<http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>), noviembre de 2008

en la atmósfera, llamados gases de efecto invernadero (GEI, o GHG en su sigla en inglés).

Aunque la atmósfera de la Tierra está compuesta casi en su totalidad por oxígeno y nitrógeno, ninguno de estos gases produce efecto invernadero. El porcentaje de calor que se devuelve a la superficie depende de la concentración de otros elementos en el aire que las contienen. Entre ellos están el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄), el ozono (O₃), los clorofluorocarbonos (CFC-11 y 12), el dióxido de carbono (CO₂) y los halones. Aunque son los CFC los que absorben con mayor efectividad la radiación infrarroja, siete mil veces más que el CO₂, es este último el que se encuentra en mayor proporción en la atmósfera, siendo el responsable de la mitad del calentamiento terrestre.

La tabla siguiente muestra la contribución al calentamiento del clima de los principales gases de efecto invernadero (GEI) y las fuentes de sus emisiones excesivas:

Tabla 3.1. Gases de Efecto Invernadero

Gas efecto invernadero	Fuentes	Potencial químico ²
Dióxido de carbono CO ₂	Quema de combustibles fósiles (carbón, derivados de petróleo y gas), reacciones químicas en procesos industriales (como la producción de cemento y acero); cambio de uso de suelo (deforestación)	1
Metano CH ₄	Descomposición anaerobia (c6gultivo de arroz, rellenos sanitarios, estiércol), escape de gas en minas y pozos petroleros	21
Óxido nitroso N ₂ O	Producción y uso de fertilizantes nitrogenados, quema de combustibles fósiles	310
Hidrofluorocarbonos HFCs	Procesos de manufactura; usados como refrigerantes	140-11,700
Perfluorocarbonos PFC's	Procesos de manufactura; usados como refrigerantes	6,500-9,100
Hexafluoruro de azufre SF ₆	Procesos de manufactura, donde se usa como fluido dieléctrico	23,900

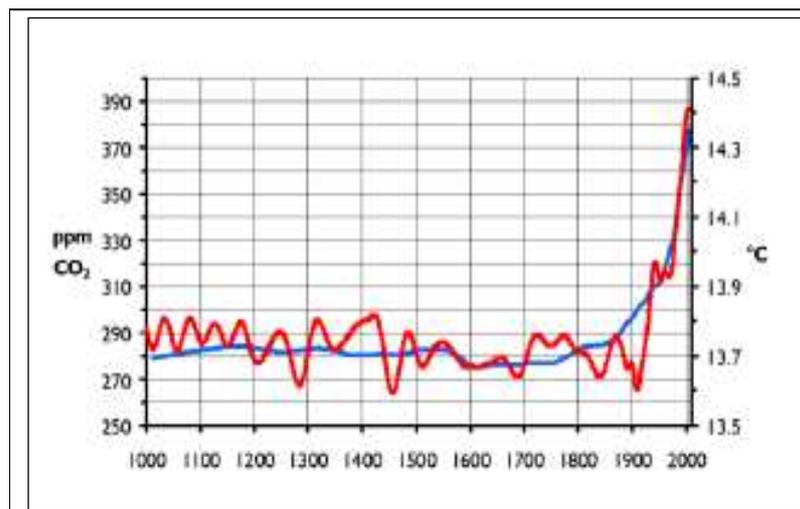
Fuente: Inclán Ubaldo, *Mercado de bonos de carbono y sus beneficios potenciales para proyectos en México*, SENER, Junio 2005.

² El potencial químico está referido e n base al CO₂, al cual se le atribuye la unidad como valor. Esto quiere decir que por ejemplo el óxido nitroso contribuye 310 veces más al efecto invernadero que el CO₂.

Como se puede ver el potencial de calentamiento de algunos GEI es bastante grande en comparación con otros. El dióxido de carbono (CO_2), gas inodoro, incoloro y con un ligero sabor ácido, es producido por diversas fuentes, como la respiración de los seres vivos, la destrucción y fermentación de sustancias orgánicas y la combustión de combustibles fósiles. Las emisiones de CO_2 se compensan con la absorción de grandes cantidades de este elemento por parte de las plantas terrestres y marinas.

Por millones de años las cantidades existentes de gases de efecto invernadero (GEI) mantuvieron un equilibrio global al ser emitidos naturalmente mediante la descomposición de materiales de plantas y animales, y absorbidos por los océanos y bosques. Pero a partir de la Revolución Industrial cambiaron drásticamente las fuentes de emisión. Las actividades productivas modernas condujeron a un enorme incremento en la extracción de energía de combustibles fósiles, siendo primero el carbón, y luego, el petróleo y el gas natural.

Figura 3.1. Gráfico de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre y la temperatura media global en los últimos 1000 años.



Fuente: Aversano Nicolás; Temperini Tiziana, *El calentamiento global : Bonos de carbono, una alternativa*, Modelización y Simulación de Sistemas Económicos, Diciembre de 2006

La intensificación del efecto invernadero en las últimas décadas, como consecuencia de los niveles más elevados de GEI asociados a las actividades industriales y agrícolas que viene realizando el hombre, así como también la deforestación; han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el dióxido de carbono (principal responsable del efecto invernadero). Es así como la temperatura global se está incrementando sensiblemente con las considerables implicaciones negativas que este recalentamiento pueda tener para la humanidad y el entorno³.

3.2 Respuesta al calentamiento global: El Protocolo de Kyoto.

Para conducir políticamente al mundo en la dirección de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), derivadas de las actividades económicas humanas y revertir el calentamiento global, se han llevado a cabo variadas iniciativas⁴. La más importante y creíble comenzó a concretarse en diciembre de 1997: El Protocolo de Kyoto.

En esa oportunidad se firmó un importante tratado (a ratificar posteriormente) que comprometía a las 39 naciones más industrializadas a reducir las emisiones de seis gases que contribuyen al cambio climático (enumerados en el Anexo A del Protocolo): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Este acuerdo, suscrito en la ciudad japonesa de Kyoto, consiste en que durante un período de compromiso, que se extiende entre el año 2008 y 2012, los países considerados por el acuerdo como los principales responsables de las emisiones (y que aparecen enumerados en el Anexo I del Protocolo) debían

³ Información extraída de: Ávila Luis Medina, *Calentamiento global y bonos de carbono*, 2008.

⁴ En 1979 se celebró la Primera Conferencia Mundial Sobre el Clima. En 1992, y como resultado de la Segunda Conferencia Mundial Sobre el Clima de 1990 y de los estudios realizados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), agencia especializada de Naciones Unidas creada en 1988, se llevó a cabo la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro (Cumbre de Río), en la cual se celebró el Convenio Marco de la ONU sobre el cambio climático firmado por 155 países y que entró en vigor dos años más tarde. Esta acuerdo Marco fue la base cualitativa del Protocolo de Kyoto.

reducir en conjunto las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 5.2% con relación a las que se emitían en 1990.

Para el logro de los objetivos convenidos, cada parte se comprometía, de manera diferenciada, a variar sus emisiones respecto de 1990 de la siguiente manera (Anexo B del Protocolo): Unión Europea y otros, -8%; Estados Unidos, -7%; Japón, Canadá, Hungría y Polonia, -6%; Croacia, -5%; Rusia, Ucrania y Nueva Zelanda, 0%; Noruega, +1%; Australia, +8%; e Islandia, +10%. Para que el Protocolo de Kyoto se pusiera efectivamente en vigor, se requería que fuera ratificado, a partir de marzo de 1998, por un 55% de los países del Anexo I, cuyas emisiones de dióxido de carbono alcanzaran el 55% del total de esas naciones.

Uno de los grandes desafíos que tuvo que hacer frente el Protocolo de Kyoto para su puesta en marcha fue la deserción del mayor productor de CO₂ del mundo. En efecto, en marzo de 2001 el gobierno de E.E.U.U. se negó a ratificar los acuerdos sobre el calentamiento global, posición que se ha mantenido hasta ahora, y con ello dejó por “muerto” el Protocolo de Kyoto⁵. Diversos grupos ambientalistas señalan que una de las razones para mantener su negativa a ratificar el Protocolo de Kyoto es que ha gastado miles de millones de dólares en subsidios a los combustibles fósiles, ha impulsado la explotación petrolera en África y Asia Central y ha permitido la perforación petrolera en Alaska.

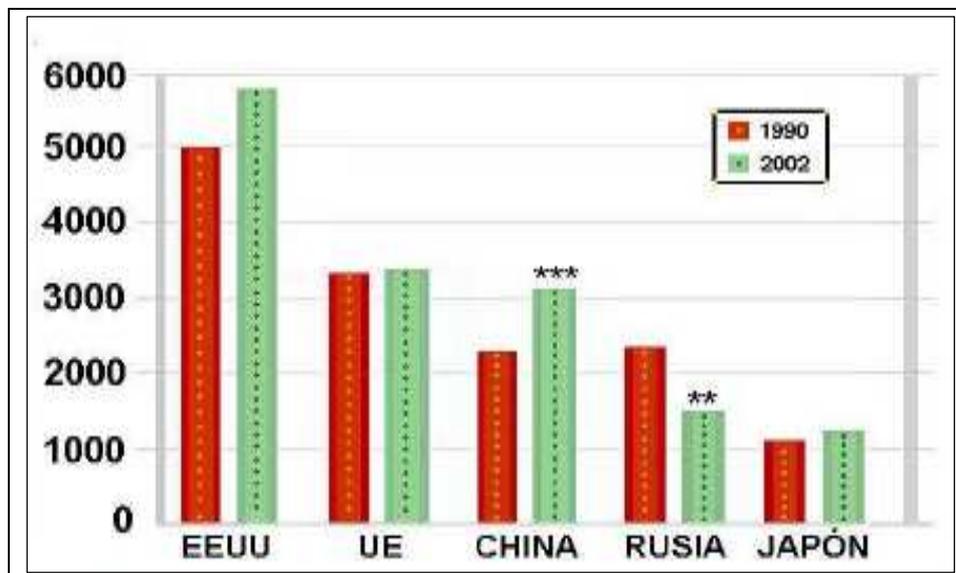
A pesar de las dificultades y de la negativa de Estados Unidos a ratificar el acuerdo, el Protocolo de Kyoto entró en vigor en febrero de 2005 después de que el gobierno ruso lo ratificara a fines de 2004. Los gigantes asiáticos, India y China,

⁵ De todos modos, cabe mencionar que en la actualidad existen varios estados norteamericanos que se han apartado de la postura del Primer Mandatario y han planeado suscribir acuerdos de reducción de emisiones de CO₂.

apoyan los compromisos del Protocolo, pero no están jurídicamente obligados a cumplir ninguna meta.

De todos modos, las expectativas de que se cumplan los objetivos de reducción de emisiones de GEI no son muy alentadoras. Y este cierto pesimismo no sólo se basa en el hecho que E.E.U.U haya declinado el Protocolo, y que incluso haya aumentado su producción de dióxido de carbono en 15% respecto a 1990, sino que los mismos estados, miembros del acuerdo de Kyoto, con la excepción de Rusia, están muy lejos de cumplir las metas. (Ver figura 3.2)

Figura 3.2. Los Grandes Emisores de CO₂, (Miles de millones de toneladas)



Fuente: En base a UNFCCC (China: IEA), en BBC Mundo.com (2005b). ** 1999. *** 2001.

3.3 Los Bonos de Carbono.

El nombre de “bonos de carbono” se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones.⁶ Así, se puede decir que existen “varios tipos” de bonos de carbono, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados:

⁶ http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html. Esta página fue consultada el día 17 de noviembre del 2008.

Capítulo 3. Bonos de carbono

- **Certificados de Reducción de Emisiones (CERs):** Los países del Anexo I que inviertan en proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, pueden obtener Certificados de Reducción de Emisiones en función de la cantidad de bióxido de carbono que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto. Para ello, el proyecto debió cumplir con los requisitos establecidos por el Consejo Ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio.
- **Montos Asignados Anualmente (AAU):** Corresponde al monto total de emisiones de gases de efecto invernadero que a un país se le permite emitir a la atmósfera durante el primer período de compromiso (2008-2012) del Protocolo de Kyoto. Cada país divide y asigna su respectivo monto a empresas localizadas en su territorio a manera de límite de emisión por empresa.
- **Unidades de Reducción de Emisiones (ERU):** Corresponde a un monto específico de emisiones de gases de efecto invernadero que dejaron de ser emitidas por la ejecución de un proyecto de Implementación Conjunta.
- **Unidades de Remoción de Emisiones (RMU):** Corresponde a créditos obtenidos por un país durante proyectos de captura de carbono. Estas unidades o créditos solamente pueden ser obtenidas por países del Anexo I del Protocolo de Kyoto y pueden obtenerse también en proyectos de Implementación Conjunta. Las Unidades de Remoción de Emisiones solamente pueden ser usadas por los países dentro del período de compromiso durante el cual fueron generadas, y son para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones. Estos créditos no pueden ser considerados en períodos de compromiso posteriores.

De todos los medios enunciados anteriormente, se eligió profundizar al Mecanismo de Desarrollo Limpio(MDL), teniendo en cuenta que de los “mecanismos de flexibilidad” éste es el único que contempla la participación de un país (No Anexo I), como es el caso de México, que al igual que otros estados de la región, cuenta con la ventaja de tener emisiones que están por debajo del límite permitido, pudiendo convertirse en un buen proveedor de bonos de carbono

para aquellos países que firmaron el Protocolo de Kyoto y superan los estándares prefijados.

Por lo tanto, las oportunidades que los proyectos MDL abren al país son inmensas y no pueden dejarse pasar. Estaríamos hablando no solo de beneficios económicos y el acceso a nuevos mercados; sino que al renovar o incorporar tecnologías que contribuyan al desarrollo sustentable del país y mejorar procesos productivos, se estarían creando fuentes de empleo al mismo tiempo que se mejora el medio ambiente y la calidad de vida de la población.

3.4 El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

El Mecanismo de Desarrollo Limpio es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kyoto en donde países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de países en desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a cumplir con su compromiso de reducción propio.

A través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) las empresas tienen la posibilidad de participar en el mercado de reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero.

El propósito del Mecanismo de Desarrollo Limpio es, de acuerdo a lo establecido por el Artículo 12 del Protocolo de Kyoto, ayudar a las Partes no incluidas en el anexo I (Partes No Anexo I) a lograr un desarrollo sustentable y contribuir al objetivo último de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, así como ayudar a las Partes incluidas en el anexo I (Partes Anexo I) a dar cumplimiento a sus compromisos contraídos en virtud del artículo 3 del Protocolo sobre la limitación y reducción de las emisiones de GEI⁷.

Mientras que el Mecanismo de Desarrollo Limpio reduce el costo de cumplimiento de compromisos ante el Protocolo para países desarrollados, las economías en desarrollo se benefician del incremento en los flujos de capital de inversión para

⁷ Grand Mariana Conte, *El cambio climático y el mercado de bonos de carbono*. Seminario de Negocios. Universidad del ECEMA, sin fecha.

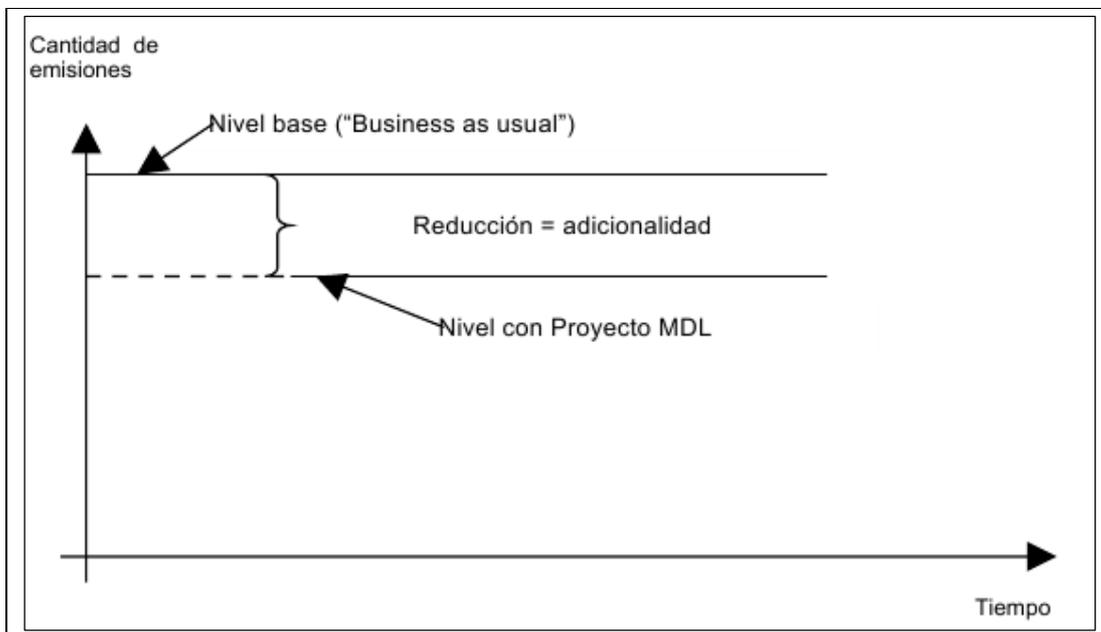
proyectos de mitigación y los resultados que estos ofrecen para las políticas de desarrollo sustentable.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio es regulado y supervisado por el Consejo Ejecutivo de MDL de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Las decisiones del Consejo Ejecutivo del MDL consideran que:

- La línea base es la referencia de las emisiones tal como ocurrirían normalmente.
- El criterio de adicionalidad como se muestra en la figura 3.3 permite asegurar que las emisiones evitadas son, precisamente adicionales a las que ocurrirían en ausencia del proyecto MDL.
- Se debe establecer una metodología de monitoreo y verificación que defina un planteamiento para el seguimiento y evaluación de los proyectos.

Figura 3. 3. Comprobación de registro de emisiones en un proyecto MDL



Fuente: Almanza Jorge, *La comercialización internacional de bonos de carbono ¿Negocio o solución?*, Facultad de Química, UNAM, 2008.

3.4.1 Actores que intervienen en el proceso del MDL

- a) El proceso de un proyecto MDL requiere de la intervención de varias instituciones, algunas de ellas creadas ex-profeso para el funcionamiento de este mecanismo.
- b) El Consejo Ejecutiva del MDL: Este es el órgano de supervisión del funcionamiento del MDL, que trabaja bajo la autoridad y orientación de la Conferencia de las Partes en calidad de Reunión de las Partes (CP/CRP).
- c) El país no incluido en el Anexo I, país en desarrollo, receptor del proyecto. Este sería el caso de México.
- d) El país Anexo I, que es el país que hace la inversión.
- e) Las autoridades nacionales designadas en cada uno de los países participantes en el proyecto, que hacen la labor de puntos focales para la tramitación de los proyectos MDL. En el caso de México, es el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero, COMEGEI.
- f) El promotor del proyecto, quien por lo general puede ser una empresa o institución del sector privado.
- g) Las entidades operacionales acreditadas por la Junta Ejecutiva del MDL, cuya labor es valorar los proyectos y verificar y certificar las reducciones de emisiones o absorciones de carbono por sumideros⁸.

3.4.2 Desarrollo de proyectos MDL

Las reglas establecidas por el Consejo Ejecutivo del MDL señalan las siguientes categorías como categorías autorizadas para el desarrollo de proyectos MDL:

1. *Industrias energéticas (renovables/no renovables)*
2. *Distribución de energía*

⁸ http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html. Esta página fue consultada el día 17 de noviembre del 2008.

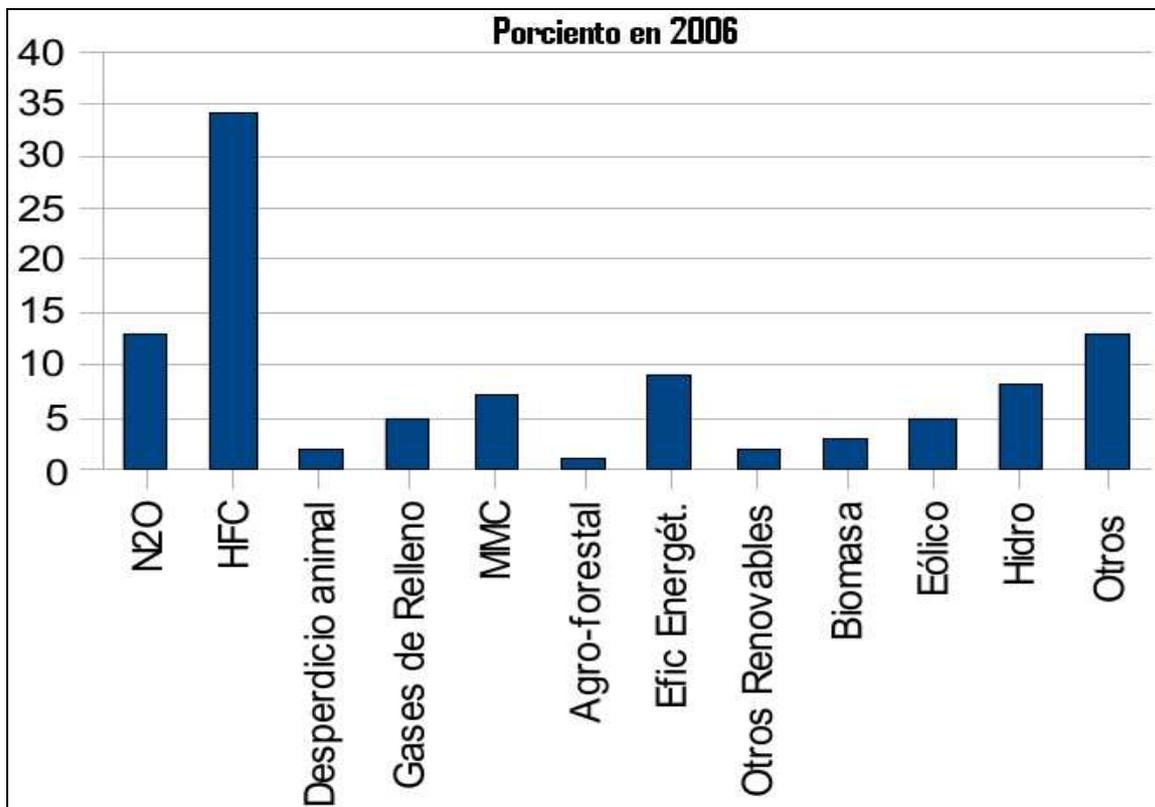
3. *Demanda de energía*
4. *Industrias manufactureras*
5. *Industrias químicas*
6. *Construcción*
7. *Transporte*
8. *Minas / producción mineral*
9. *Producción metalúrgica*
10. *Emisiones fugitivas de combustibles (sólidos, petróleo y gas natural)*
11. *Emisiones fugitivas de la producción y consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre*
12. *Uso de solventes*
13. *Disposición y manejo de desechos*
14. *Forestación y reforestación*
15. *Agricultura*

Un proyecto MDL debe cumplir con las condiciones de adicionalidad, de determinación de la línea base y de contribución al desarrollo sostenible del país, según lo establece el Artículo 12 del Protocolo de Kyoto.

En la figura 3.4, en especial en la parte izquierda, se advierte una mayor preferencia por proyectos con alto potencial calorífico y de mayor lucro, sin embargo, también se ve la escasa participación de las energías solares o de las olas y no se especifica la creación de minihidráulica. Estas últimas deben ser precisamente las de mayor potencial para los países en desarrollo pues sus recursos están precisamente ahí, lo cual no se da en los lugares septentrionales.

Un proyecto que participa en el MDL debe cumplir con el ciclo establecido de por el Consejo Directivo del MDL antes de poder recibir los beneficios económicos que resultan de esa participación.

Figura 3.4: Tipo de proyectos en MDL.



Fuente: Almanza Jorge, *La comercialización internacional de bonos de carbono ¿Negocio o solución?*, Facultad de Química, UNAM, 2008.

3.4.3 Ciclo de proyecto de un MDL.

Para instrumentar un proyecto del mecanismo de desarrollo limpio debe considerarse los siete pasos indispensables para la obtención de los certificados objeto de negociación.

La primera etapa consiste en presentar el diseño del proyecto y es un documento que requiere de una metodología precisa, de la cual existen, en este momento, aproximadamente 49 distintas. Esto se conoce con las siglas en inglés de "PDD" ("Project Design Document").

En la elaboración del Documento Diseño del Proyecto por el participante en el proyecto debe contener, de manera general, la siguiente información:

- a) Descripción general del proyecto

- b) Definición de la metodología usada para la Línea Base (baseline) del proyecto. Esta metodología debe tener la aprobación de el Consejo Ejecutivo
- c) Descripción de cómo se reducen las emisiones o se absorbe el carbono (demostración de la adicionalidad).
- d) Definición de la duración del proyecto y del período de acreditación.
- e) Análisis de los impactos ambientales
- f) Referencia a las fuentes de públicas de financiamiento
- g) Observaciones de los interesados
- h) Plan y metodología de vigilancia de los resultados del proyecto y su justificación

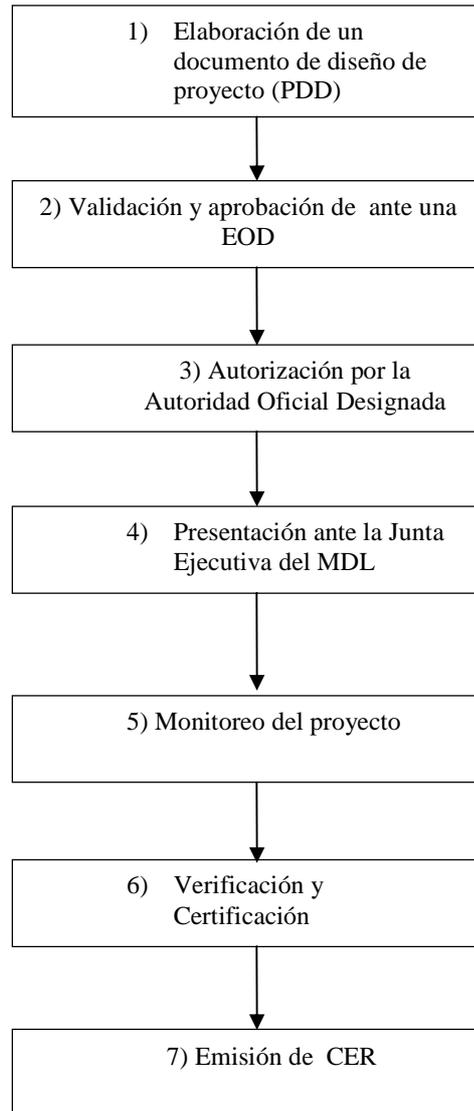
En el segundo peldaño de este procedimiento está la validación de dicho proyecto por la Entidad Operacional Designada (EOD) que es un ente especialmente abocado a los trabajos del MDL. En el caso mexicano es un organismo colegiado con personal de la Secretaría del Medio Ambiente, que colabora con el apoyo de otras dependencias: la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático y que en otros lugares se conoce como la Autoridad Oficial Designada. Esta instancia registra y aprueba si el proyecto puede presentarse a la organización internacional siguiente la Autoridad Oficial Designada.

En el tercer nivel, la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio (órgano dependiente del Sistema de Naciones Unidas) recibe la propuesta para su registro y aprobación, en su caso.

Después en el cuarto paso empieza propiamente la instrumentación del diseño por parte del participante del proyecto. Con posterioridad viene todo el desarrollo del proyecto, donde se comprueba la auténtica reducción de las emisiones, conjuntamente con la autoridad correspondiente y el promotor del proyecto. En esta etapa inician, propiamente dicho, las operaciones del proyecto. En el sexto nivel, la Entidad Operacional Designada (EOD) valida dichas reducciones para lo cual entrega una verificación y certificación escrita. Al final del ciclo, se expiden las Reducciones Certificadas de Emisiones que son los documentos negociables internacionalmente.

La Autoridad Oficial Designada registra y aprueba si el proyecto puede presentarse a la organización internacional siguiente:

Figura 3.5. Ciclo del proyecto MDL



Fuente: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html. Esta página fue consultada el día 17 de noviembre del 2008.

3.4.4 Proyectos MDL México

Hasta a mediados de octubre de 2007 la cartera de proyectos del Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de

Efecto Invernadero (COMEGEI), con cartas de no objeción y cartas de aprobación, consiste en los siguientes proyectos mexicanos del MDL con cartas de aprobación:

Tabla 3.2. Proyectos MDL en México

Tipo de Proyectos	Núm. Proyectos	Ubicación	Reducciones de CO ₂ (Ktons/año)
MANEJO DE RESIDUOS EN GRANJAS PORCÍCOLAS	88	Aguascalientes, Chihuahua, Chiapas, Coahuila, Durango, Edo. México, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Nayarti, Puebla, Querétaro, Sinaloa, San Luis Potosí, Sonora, Oaxaca, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán.	2,507
MANEJO DE RESIDUOS EN ESTABLOS DE GANADO VACUNO	54	Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Guanajuato, Durango, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala	941
METANO DE RELLENOS SANITARIOS	9	Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Edo. México, Morelos, Jalisco	1,110
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES	1	Sonora	10
ENERGÍA EÓLICA	8	Baja California, Oaxaca	2,216
HIDROELÉCTRICOS	4	Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca	161
INCINERACIÓN HFC-23	1	Nuevo León	2,155
MITIGACIÓN DE N ₂ O EN LA INDUSTRIA QUÍMICA	1	Veracruz	103
COGENERACIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA	9	Edo. México, Hidalgo, Michoacán, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Quintana Roo, Veracruz	703
EMISIONES FUGITIVAS	2	Coahuila, Veracruz	665
TRANSPORTE	1	Distrito Federal	24
TOTAL	178		10,595

FUENTE: COMEGEI, 2007. SUBSECRETARIA DE PLANEACION Y POLITICA AMBIENTAL, SEMARNAT.

Lo anterior nos muestra una situación que requiere contrastarse con los datos aquí esbozados. México emitía en el año 2004 alrededor de 370 millones de toneladas de CO₂. Con un potencial de reducciones de 33 millones de toneladas anuales, se tiene sólo una disminución del orden de menos de 10% sobre los montos emitidos en los años recientes y según nuestra investigación, ese volumen resulta

insuficiente para verdaderamente atender las necesidades de abatimiento de las emisiones.

Para tener una visión más acabada del Mercado de Bonos de Carbono y de los determinantes que influirán en el precio de los CERs, se analizarán detalladamente los mismos.

3.5 El mercado de los “bonos de carbono”.

El mercado se encuentra en la fase inicial de desarrollo. Su propósito es establecer derechos de propiedad a un bien hasta ahora considerado un “bien libre”, tal como el aire. Sus características intrínsecas exigen la existencia de una entidad de regulación que a priori establezca y facilite las condiciones de su intercambio.

Así surge la Convención Básica para el Cambio Climático (UNFCCC).

Características:

- Muy dinámico.
- Fuerte demanda de CERs.
- Oferta limitada (reacción lenta en cantidad de proyectos).
- Costos de transacción altos.
- Tiempos prolongados para el proceso de aprobación.
- El mercado actual está basado en proyectos y no en CERs.
- Mercado secundario con riesgos importantes y posibilidad de grandes ganancias.

Gracias a este mercado internacional de bonos de carbono ha ido tomando fuerza entre los inversionistas la idea de que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) podrían capitalizarse en un mercado de alto potencial financiero, que podría mover miles de millones de dólares en el mundo. De hecho, sólo en el primer trimestre de 2005, las transacciones en el mercado del carbono alcanzaron un volumen de 43 millones de toneladas métricas (tm de CO₂), lo que representa casi la mitad de lo acordado en 2004 (Diario Financiero, 2005a). En actualidad, ya están funcionando incluso mercados secundarios de este tipo de instrumentos, permitiendo, entre otras cosas, que distintos inversionistas compren estos títulos para venderlos a empresas que necesitan cumplir metas de reducción de emisiones.

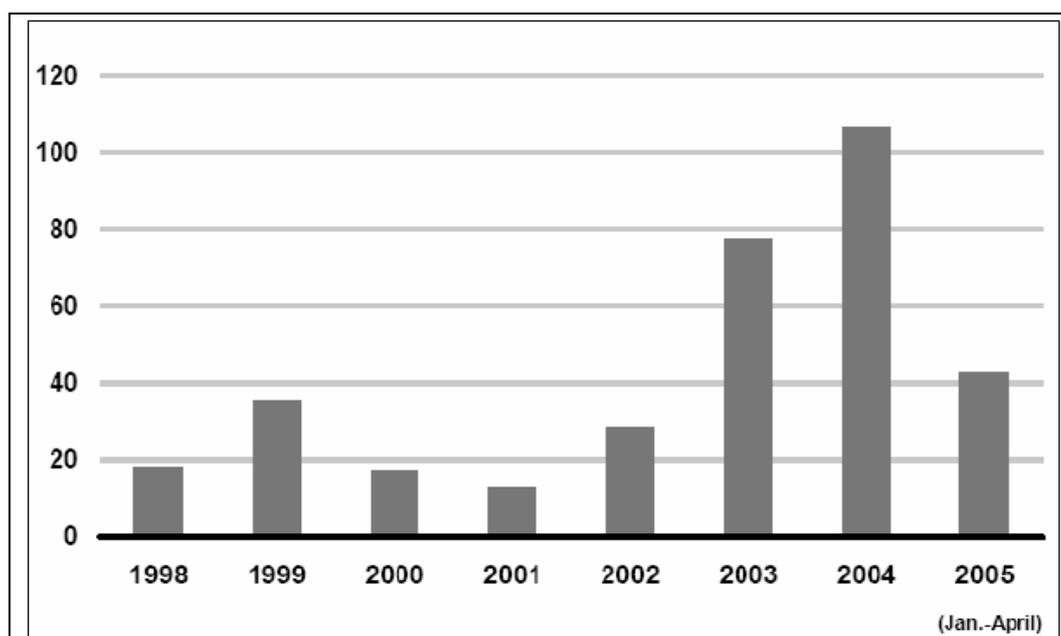
3.5.1 Evolución de los mercados.

A continuación se presentarán diversas descripciones por las que ha pasado este comercio entre finales de la década pasada y 2007.

En el cuadro 19 se aprecia que, entre 1998 y principios de 2005, en lo relativo a las transacciones basadas en proyectos, sólo se habían comercializado 339 millones de toneladas de CO₂e y esto en relación con el periodo que abarcaría hasta 2012.

Los datos de las publicaciones más recientes sobre este mercado confirman la misma preocupación, pues en los años 2006 y 2007 se comercializaron respectivamente 1,745 y 2,983 millones de toneladas de CO₂ por un valor de \$31,235 US\$/año y \$54,035 US\$/año respectivamente⁹.

Figura 3.6. Volumen anual (millones de TCO₂) comercializadas



Fuente: Inclán Ubaldó, *Mercado de bonos de carbono y sus beneficios potenciales para proyectos en México*, SENER, Junio 2005.

⁹Fuente: Carbon Finance at the World Bank: Community Development Carbon Fund. <http://carbonfinance.org/>.

3.5.2 Tipos de Transacciones

1) Transferencia Inmediata

2) Contratos a Futuro

Implica la transferencia futura de CERs (aún no expedidos) en una fecha específica. En general este tipo de transacciones implica un Acuerdo de Compra de Reducción de Emisiones.

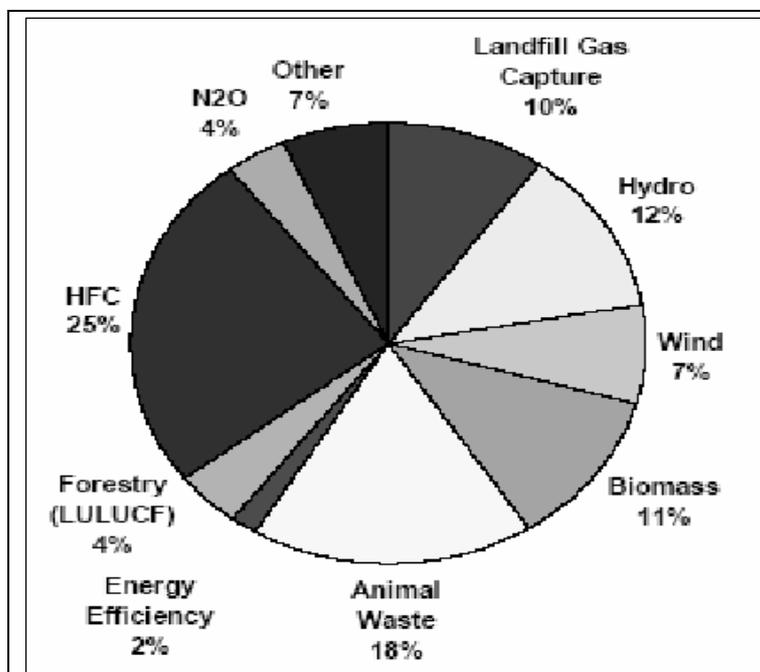
3) Acuerdos de Compra de Reducción de Emisiones

El proponente del proyecto vende al comprador los derechos de la totalidad o parte de la reducción de emisiones a lograr por el proyecto. El acuerdo contiene información sobre el volumen estimado de reducción de emisiones anual, el volumen mínimo a ser comprado, el precio acordado y las condiciones de pago. En general, el pago se efectúa contra entrega de los CERs, pero en algunos casos es posible obtener un adelanto.

3.5.3 Participantes

1) Oferta (vendedores): Países No Anexo I, pudiendo ser presentados los proyectos MDL por personas físicas, jurídicas u organismos estatales.

Figura 3.7. Vendedores de bonos de carbono



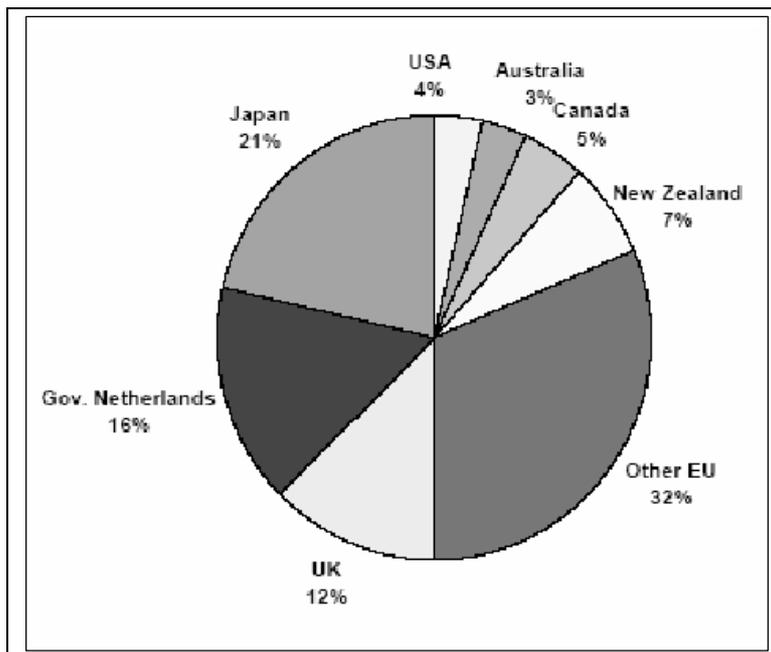
Fuente: Inclán Ubaldo, *Mercado de bonos de carbono y beneficios potenciales para proyectos en México*, SENER, Junio 2005.

En la figura anterior se puede observar el porcentaje que representa cada uno de los vendedores en el mercado y el cual está acaparado principalmente por India y Asia.

2) Demanda (compradores)

Países Anexo I, pudiendo ser gobiernos o empresas de estos que los utilizan para cumplir con parte de los compromisos. También están incluidos los intermediarios como por ejemplo fondos multilaterales (Fondo Prototipo de Carbono). En el siguiente gráfico se puede observar el porcentaje que representa cada uno de los compradores en el mercado y el cual está concentrado principalmente en la Unión Europea y en Japón debido al fuerte compromiso que tienen por su reducción de emisiones de CO₂.

Figura 3.8. Compradores de bonos de carbono



Fuente: Inclán Ubaldó, *Mercado de bonos de carbono y beneficios potenciales para proyectos en México*, SENER, Junio 2005.

3) Intermediarios

- Corredores (*brokers*): son intermediarios en el ciclo del proyecto que compran y venden CERs. Algunas veces pueden brindar servicios de consultoría.

- Estudios Jurídicos: participan, entre otros, en la elaboración de acuerdos de compra de reducción de emisiones.
- Bancos y entidades financieras: libran préstamos y permiten utilizar como garantía un acuerdo firmado de compra de reducción de emisiones.
- Desarrolladores de Proyectos (Consultores): Ofrecen distintos servicios que, en la mayoría de los casos, incluyen: diseño del proyecto (elaboración del Documento de Diseño de Proyecto, establecimiento de la línea de base y plan de monitoreo), interacción con las Entidades Operacionales Designadas y búsqueda de comprador de los CERs generados por el proyecto.
- Bolsas Comercio: Ofrecen las cotizaciones de los bonos de carbono para ser utilizados como valores de referencia.
- Banco Mundial: Institución internacional que desarrolló una serie de instrumentos de financiación para incentivar a las naciones a invertir en tecnologías limpias de GEIs, entre los que se encuentran el Prototype Carbon Found (PCF).

3.5.4 Tamaño del Mercado

Sus dimensiones dependerán de los siguientes factores:

- Disparidad de los costos de reducción de las emisiones de GEIs entre las ramas industriales así como entre los países del mundo.
- Se estima que a medida que se aproxime el primer período de compromiso (2008-2012) ira creciendo el tamaño del mercado de bonos, ofreciendo así un estímulo de cada tonelada de Dióxido de Carbono equivalente.
- Las perspectivas del mercado estarían centradas en los acuerdos post – Kyoto y en la magnitud de sus restricciones para el período siguiente.
- Cantidad, eficiencia y dinamismo de las bolsas que coticen los bonos a nivel mundial, así como también aquellas instituciones que breguen por al transparencia en este mercado (seguridad jurídica).
- Las condiciones del mercado mundial de petróleo (reservas limitadas y los conflictos en los países productores) llevan a continuas alzas en el precio del crudo, incentivando la búsqueda de energías alternativas a las provenientes de

hidrocarburos, y por lo tanto a la utilización de bonos de carbono como una oportunidad para su financiamiento.

- Limitación de CERs que pueden utilizar los países Anexo I para el cumplimiento de sus obligaciones (1% del año base) según el Acuerdo de Marrakesh.

3.6 Impacto de los bonos de carbono en un proyecto de inversión.

Ante todo proyecto de inversión hay que tomar en cuenta aspectos que nos pueden hacer un proyecto más rentable como son los bonos de carbono. La forma de beneficiarse es a través del MDL en donde un país en vías desarrollo como es el caso de México es financiado por un país industrializado para que cumpla con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

INE ha estimado que México tiene un potencial de reducción y captura de emisiones cercanas a los 81 millones de toneladas de CO₂/año entre el 2010 y 2012. En el mercado del MDL, esto podría traducirse en ingresos de más de 480 millones de euros anuales. Sin embargo, tan solo CFE puede tener un mercado de reducción de emisiones del orden de 100 MM US\$/año.

Como un ejemplo claro, PEMEX ha vendido más de 300,000 bonos de carbono a la empresa *Statoil*, equivalentes a la reducción de la misma cantidad de toneladas de dióxido de carbono. Los ingresos obtenidos se han invertido para evaluar proyectos potenciales de reducción de gases invernadero en las refinerías de Salina Cruz, Tula y Cadereyta. Es importante buscar diversas alternativas en el Mercado Internacional, es un mercado volátil en desarrollo. El precio de la tonelada de CO₂ que se deja de emitir oscila entre los 10 y 15 dólares y va a la alza debido al fuerte compromiso que tienen los países industrializados para bajar los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos al medio ambiente.

Es necesario evaluar el potencial real del mercado y realizar proyectos demostrativos. Estos ingresos ayudarán a promover el desarrollo de proyectos en los sectores energético, industrial, agrícola y forestal.

En el sector industrial las mayores oportunidades están en el ahorro y uso eficiente de energía, así como en el aprovechamiento de energías renovables, pero es importante integrar proyectos de suficientemente grandes para ser atractivos.

3.7 Conclusiones.

Con la realización de este capítulo se logró un conocimiento más integral de la problemática del calentamiento global, así como también de las implicancias económicas y sociales de uno de los mecanismos de flexibilidad, el MDL; que, mirándolo desde la perspectiva de los países desarrollados (PD), constituye, por el momento, la única forma de incluir a los países en vías de desarrollo (PED) en el esfuerzo global de mitigación del cambio climático. Desde el lado de los países como el nuestro, el MDL constituye el único mecanismo de flexibilidad que posibilitará la obtención de financiamiento adicional proveniente de PD para aquellos proyectos que reduzcan emisiones de GEI.

De igual manera, es importante mencionar que el país si incluyera proyectos como el tratamiento de residuos sólidos municipales podría competir en el mercado de los bonos de carbono a través del MDL y si es posible cambiar la jerarquización de las tecnologías, en donde prevalezca la que cuente con una menor cantidad de CO₂ emitido y por consiguiente se consigan ingresos adicionales; pero lo más importante es que se estaría incorporando una tecnología más limpia.

El desafío es grande y el tiempo apremia, la pregunta que debemos hacernos es: ¿estaremos a la altura de los acontecimientos? ¿Acaso esto permita una reversión de los flujos financieros entre los países en desarrollo y los desarrollados, al incluir la problemática ambiental? Quedan también por incorporar al debate algunos puntos débiles de este protocolo convertido en negocio, como el hecho de que se está pensando en cambios estructurales de gran envergadura para un compromiso que en principio se extendería sólo hasta el 2012. También deberíamos repensar la paradoja que esta situación presenta: “No es necesario reducir la contaminación a escala global. Se trata de que contamine el que pueda pagarlo al precio que sea”.

Las herramientas utilizadas nos han permitido visualizar las trayectorias posibles de los precios de los CERs, teniendo en cuenta eventuales factores que afecten a este mercado. Observamos, y nos animamos a predecir que el precio de los CERs, a pesar de las fluctuaciones iniciales que pueda sufrir, claramente denota

una tendencia alcista, indispensable para que se cumpla el objetivo principal del mecanismo.

Estoy convencido de que más allá de plantearnos al MDL como un criterio de compensación justo o, ya sea, viéndolo desde una perspectiva de nuevas ganancias adicionales, claramente es una oportunidad que necesita del esfuerzo conjunto para poder desarrollarse y prosperar. Es indispensable comenzar a interiorizarse en el tema y conformar alianzas interdisciplinarias entre los profesionales para así poder brindar servicios de asesoría y consultoría, atendiendo a las necesidades tanto del sector público como del sector privado en el desarrollo de proyectos que permitan la obtención de beneficios a través de la comercialización de los bonos de carbono generados por los mismos. Es clave en este proceso el establecimiento de una red de contactos y sus iniciativas, así como también la capacidad de adaptación de éstos grupos interdisciplinarios con que tendrán que contar para poder además de asistir técnicamente a quienes recurran a ellos, detectar potenciales proyectos.

Capítulo 4

Selección de tecnología

Este capítulo tiene como objetivo la aplicación de la metodología propuesta para llevar a cabo la selección de la tecnología térmica más recomendable para el tratamiento de los RSM.

Toda la información presentada anteriormente en los capítulos anteriores, se filtrará y se seleccionará, mediante los conductos del método propuesto, se presentarán ventajas y desventajas de las cuatro tecnologías propuestas. Por último, se realizará una comparación, de la metodología propuesta y se presentarán los resultados de la selección, mediante una tabla resumida del método propuesto y se utilizará un software especializado con el fin de tomar decisiones más acertadas referentes a la tesis planteada.

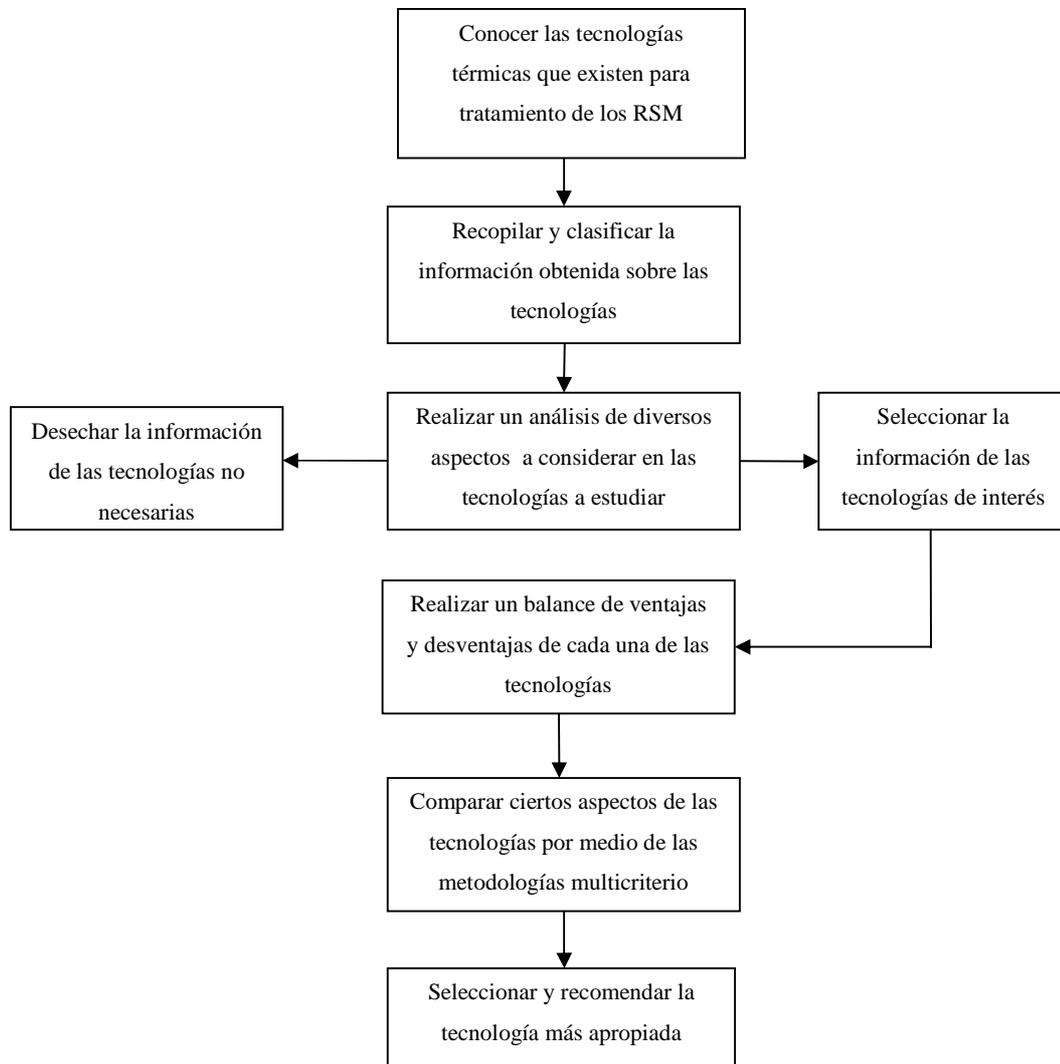
4.1 Descripción de la metodología para selección de tecnología.

La presentación de la metodología de selección que se llevará a cabo en el presente capítulo tiene un punto de inicio que es la ubicación de ella en el proceso de transferencia de tecnología, mediante una buena evaluación y es integral toda vez que integra gran variedad de parámetros dentro de la evaluación y posterior en la selección de procesos.

Como se puede ver en la figura 4.1 nos describe un procedimiento de manera simple que se elaboró para poder partir de una necesidad, la cual sabemos es resolver el problema de tratamiento de RSM. Para esto el primer paso es detectar y conocer las tecnologías térmicas existentes hasta llegar al punto en el cual se realice la selección y recomendación de la tecnología más apropiada.

Hay que mencionar que en un punto intermedio de la metodología planteada se debieron considerar ciertos criterios preliminares tales como la experiencia demostrada por los licenciadores de cada una de las tecnologías, la confiabilidad y emisión gases tóxicos de cada uno de sus procesos, escalamientos de diseño, la eficiencia que muestran para la recuperación de energía así como costos de inversión; el cual nos sirvió como un filtro inicial para hacer una selección previa entre un grupo de tecnologías térmicas existentes.

Fig. 4.1 Metodología para la selección de la tecnología a utilizar



Fuente: Elaboración propia a partir de Collí Ramírez Juan, *Metodología para la selección de procesos*, Facultad de Química, UNAM, 2006.

Es importante hacer notar que gran parte de la información obtenida de las tecnologías estudiadas es de fuente pública y la cual ponen a su disposición las empresas para el conocimiento del cliente. Incluso hay algunas tecnologías que no proveen información necesaria para el cliente de parámetros clave por el carácter de confidencialidad que representan los procesos desarrollados, aún cuando ya esté aprobado el proyecto para su implementación.

4.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas.

Para llevar a cabo la comparación de las tecnologías estudiadas, es conveniente hacer un balance de las ventajas y desventajas de cada una de estas tecnologías seleccionadas con el fin de tener un panorama más amplio y en donde a su vez se resumen propiamente las características relevantes de estas tecnologías.

A continuación se detallan las ventajas y desventajas de las tecnologías seleccionadas:

Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC) de Solena Group

Ventajas:

- Flexibilidad en el tipo de alimentación que puede tener el gasificador de plasma.
- No debe haber un pretratamiento como tal, aunque es preferible.
- El combustible alimentado a las turbinas de gas puede ser tanto gas natural como el mismo gas de síntesis generado por el proceso.
- Se obtiene en el gas de síntesis un poder calorífico promedio de 3600 KJ/kg de RSM
- Debido a que se tiene una alimentación a contracorriente sirve para secar la entrada de desechos y por tanto, permitir que el sistema pueda manejar una corriente de desechos con contenido de humedad de hasta un 90% en peso, sin tener un aumento proporcional en las necesidades de consumo de energía.
- Al agregar aire enriquecido de oxígeno y el catalizador a base de carbón, ayuda a obtener consumos menores de energía por las antorchas de plasma que oscilan entre 150 a 300 kWh/ton de RSM procesado.
- La recuperación total de la energía del proceso utilizando una turbina de ciclo combinado oscila entre 36-40% de eficiencia térmica, lo que hace que sea autosuficiente en energía eléctrica, ya que el 25% de la energía producida es para el proceso y el restante puede ser comercializada.

- El proceso *IPGCC* es aproximadamente de 15% a 20% más eficiente que la incineración. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ por kw generado también van a ser 5% a 20% menores¹.
- Efectividad en la destrucción de gases contaminantes como dioxinas y furanos debido a las altas temperaturas presentadas en el gasificador.
- Alternativamente, el H₂ contenido en el gas de síntesis puede ser alimentado directamente a un sistema de celdas a base de combustible para la generación de electricidad y agua.

Desventajas:

- Debido a que es una tecnología relativamente nueva, no cuenta con una amplia experiencia en el mercado. Aunque se sabe que la gente que conforma la compañía ha trabajado en diversos proyectos referentes a este campo.
- Si existen variaciones altas en el contenido de la alimentación de desechos afectarán las condiciones de salida del proceso y requerirán ajuste las variables de control independientes como la altura del lecho del catalizador de carbono y el flujo de aire necesario para el proceso.
- Se debe tener especial cuidado en la etapa de limpieza y acondicionamiento del gas que es un tratamiento costoso, ya que hay determinadas cantidades de impurezas, partículas o gases ácidos que no son adecuados para el normal y seguro funcionamiento de la turbinas de gas.
- El poder calorífico obtenido en el gas de síntesis es de 1/3 a 1/6 con respecto al gas natural y eso se ve reflejado en el mayor consumo de gas de síntesis para la generación de energía eléctrica.

¹ Fuente: Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008.

Plasma Enhance Melter(PET™) de Integrated Environmental Technologies(IET)

Ventajas:

- IET ha desarrollado un sistema de gasificación y vitrificación para el tratamiento de los diferentes tipos de residuos sólidos: municipales, médicos, químicos y peligrosos.
- Dos fuentes de energía se utilizan para procesar los residuos: la CD (corriente continua) de zona de arco de plasma y la CA (corriente alterna), los cuales no requieren de agua para su enfriamiento y según sus eficiencias eléctricas son cercanas al 98%².
- Comparando el sistema PET™ con las antorchas de plasma, éstas últimas sufren corrosión debido a la alta temperatura obtenida en la porción del electrodo de cobre de la antorcha y hay subsecuentes fugas en el sistema de agua de enfriamiento dentro de la cámara de proceso. Muchas fugas en la superficie caliente del vidrio fundido ocasionan perturbaciones en las reacciones químicas.
- Ha incorporado novedades en su tecnología para la conversión de energía a partir de RSM, tomando en cuenta que se puede usar el gas de síntesis obtenido tanto en un proceso de combustión como es el caso de una turbina de gas o en un proceso de no combustión como el caso de la celda de combustible que puede tener eficiencias mayores a las alcanzadas con la turbina.
- Además del gas de síntesis se obtienen dos subproductos como el metal y el vidrio. Éste último tiene diversas aplicaciones en la industria de construcción, cumpliendo las normas requeridas en los materiales.
- En cuanto a emisiones se destruyen gran parte de contaminantes peligrosos y cumpliría con gran parte de la normatividad de diversos países, como la prueba de lixiviado en el vidrio obtenido como subproducto.

² Fuente: Quapp, William J, *General Description of the PEM™ White paper*, Integrated Environmental Technologies, LLC, 2002.

Desventajas:

- Aunque se puede aceptar cambios en la composición de RSM, el sistema de plasma no debe ser considerado como una alternativa en una planta de tratamiento de aguas residuales, ya que puede caer en costos elevados en el procesamiento.
- Los requerimientos de energía son altos para la operación del sistema PEM™ varía entre 750 y 3000kWh/ ton, aunque la planta puede ser autosuficiente en energía eléctrica.
- Debido al desgaste de los electrodos de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), se requieren cambiarlos y el ciclo de vida aproximado es de 200 horas.
- Es limitada la tecnología ya que no ofrece escalas de procesamientos mayores a 10 ton/día.
- Se sabe que se necesitan costos de capital grandes cercanos a 5 millones de dólares para el modelo 4 y 10 millones de dólares para el modelo 10.
- Es una tecnología que lleva pocos años de experiencia en el mercado, pero muchas de las aplicaciones de la tecnología se han usado para tratar desechos médicos y peligrosos como es el caso de la planta instalada en Honolu, Hawai.

Direct Melting System (DMS) de Nippon Steel

Ventajas:

- La adición de un exceso de oxígeno asegura la perfecta combustión de los materiales sólidos.
- Los gases calientes que salen de la cámara de combustión contiene un poder calorífico medio que alimenta a una turbina para la generación de energía que es reutilizada en el proceso.
- Las condiciones del vapor mantienen los niveles mínimos de corrosión en la caldera.
- La energía eléctrica generada (34MWh) supera el auto consumo³.

³ Fuente: Nippon Steel Engineering Co., *Direct Melting System*, Nippon Steel, Release 2007.

Capítulo 4. Selección de tecnología

- Es una tecnología probada comercialmente y cuenta con amplia experiencia en el mercado ya que cuenta con diversas plantas ubicadas en distintas partes de Japón.
- Inyección de combustible, se tratan las dioxinas y furanos existentes, cumpliendo con las normas más estrictas sobre emisiones
- Las cenizas y los residuos se mezclan con las proporciones adecuadas de cementos y agua, a fin de formar un mortero, para utilizarlo en la construcción.

Desventajas:

- El transporte de los residuos en camiones hacia los vertederos contamina más que la propia tecnología.
- Las escorias utilizadas para asfaltos contamina los mantos sub-acuíferos al producirse una lluvia acida y estos se transportan hacia los mantos acuíferos.

TwinRec de Ebara Corporation

Ventajas:

- Los metales como el aluminio, cobre y hierro pueden ser reciclados como productos valiosos de la corriente de salida de la parte inferior del gasificador, ya que no son ni oxidados ni sinterizados con otros componentes de la ceniza.
- Utiliza relativamente baja proporción de aire para disminuir la velocidad de reacción de gasificación, por lo tanto, para llevar el control de la temperatura del lecho fluidizado y homogenizar el gas generado.
- Un gasificador puede recibir una carga de lecho de 2 a 3 veces mayor en comparación con un incinerador, por lo tanto, la zona del lecho puede reducirse a la mitad.
- En comparación con métodos convencionales de incineración, la cámara de

combustión ciclónica reduce drásticamente la generación de dioxinas en virtud de la combustión a alta temperatura.

- Es considerada por el momento una de las plantas de Ebara con mayor capacidad del mundo en lo que se refiere a la gasificación de residuos y fusión de cenizas, lo que confirma que es una tecnología confiable y con amplia experiencia para el tratamiento de RSM.
- Como el sistema no requiere de combustibles secundarios tales como combustible fósil y los RSM se funden a través de una reacción exotérmica, hace que se genere menos monóxido de carbono.
- Dado que la ceniza se convierte en escoria por la alta temperatura de combustión y cumple con las normas nacionales relativas a la fusión y solidificación, la escoria se puede utilizar como pavimento y como material de construcción y a su vez, como una alternativa para sustituir a la grava.

Desventajas:

- Se tiene que depositar cenizas en un vertedero provenientes del gasificador, de la caldera y del tratamiento de limpieza del gas.
- Se tienen bajas eficiencias térmicas que van del 17 al 25% en las turbinas de vapor pero se obtienen de 372 a 600Kwh/ton de RSM⁴.
- Se requiere un pretratamiento de los RSM, ya que las partículas deben tener diámetros menores a 300mm con la finalidad de tener un mejor procesamiento de los RSM.
- En la limpieza del gas seco con residuos triturados de automóvil (RTA) no cumplen con las normativas respectivas sobre emisiones de HBr, HCl, y Br₂.
- De no controlarse el tiempo de residencia del gasificador puede provocar problemas en la operación del mismo que se verán reflejados en la calidad del gas de síntesis obtenido y de igual manera en la recuperación de energía.

⁴ Fuente: Ebara Corporation, Zurich Branch ,A. Selinger, Ch. Steiner and K. Shin, *TwinRec Gasification and Ash Melting Technology –Now also established for Municipal Waste*,2003

Tabla 4.1. Cuadro comparativo de características de las tecnologías estudiadas.				
Datos técnicos	Gasificación por plasma		Gasificación convencional	
	Solena Group	Integrated Environmental Technologies	Nippon Steel	Ebara
Capacidad mínima	43,800-87,600 ton/año	182.5 ton/año	3,650ton/año	26,280ton/año
Capacidad máxima	131,400-175,200 ton/año	3,650ton/año	189,800ton/año	547,500ton/año
Alimentación	Biomasa, RSM, coque, residuos finos	RSM, residuos peligrosos y residuos médicos por mencionar algunos	RSM, lodos depurados, residuos industriales	RSM, lodos depurados, desechos semilíquidos.
Pretratamiento	Trituración, desmenuzamiento y compactación de RSM	Compactación de RSM	Se requiere homogenización a un tamaño de partícula deseado por medio de trituración	Se debe reducir los residuos a diámetros de partículas menores a 300mm
Temperatura del reactor	5000°C	5000-6000°C	300-1000°C	500-600°C
Presión	Presión atm	NR		Presión atm
Catalizador	Coke, cal y aire enriquecido con oxígeno	Aire	Coke, piedra de cal y aire enriquecido con oxígeno	Aire enriquecido con oxígeno
Producto principal	Gas de síntesis	Gas de síntesis	Gas de síntesis	Gas de síntesis
Poder calorífico del gas	5,590-11,180 kJ/m ³	9,314-10,804 kJ/m ³	NR	NR
Subproductos	Slag	Vidrio y metal	Slag	Slag(partículas inertes y metálicas)
Eficiencia térmica(kWh/ton)	970	1100	350	670
No. plantas en operación	NR pero hay en construcción	6	26	13
Emisiones	No genera dioxinas y furanos, y se tienen cantidades menores a 15ppm de NOx	No genera dioxinas y furanos, bajas emisiones NOx	CO, CO ₂ , NOx, SOx y bajas emisiones en furanos.	Bajas emisiones de dioxinas debajo de 0.1(ng TEQ/Nm ³)
Método de purificación de gas	Enfriamiento, filtrado y depuración	Enfriamiento, filtrado, depuración, eliminación de humedad, recalentado y pasado a un filtro retenedor de partículas de Hg	Enfriamiento y se usa precipitador electrostático	Filtro colector de polvos y se someten los gases a enfriamiento y a una depuración previa a descarga a atmósfera

NR: Son los datos que no han sido reportados.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información consultada en folletos y artículos en Internet.

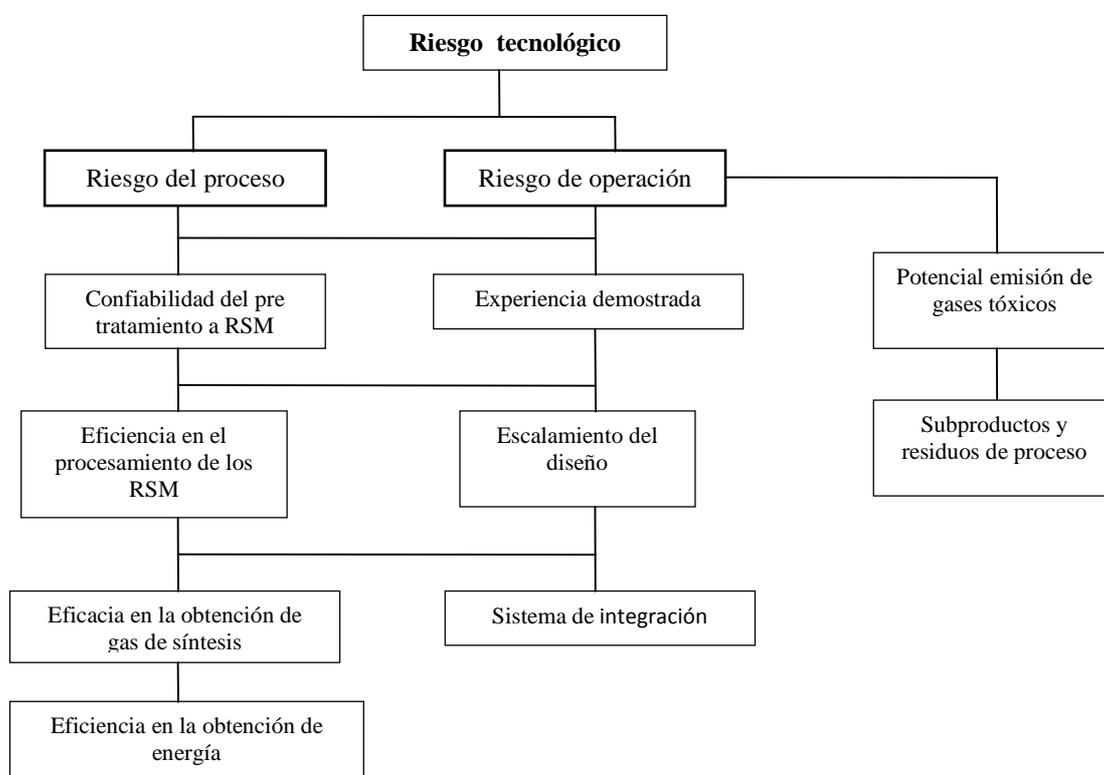
En la tabla 4.1, se presenta un resumen de las características más importantes de las tecnologías estudiadas, facilitando el análisis y la comparación de las ventajas y desventajas de las tecnologías seleccionadas.

4.3 Aspectos a considerar en la selección de tecnología.

Siempre cuando se decide en incorporar una nueva tecnología a un proceso ya sea para aumentar el nivel de producción de una empresa o para satisfacer una necesidad como es nuestro caso, la cual es el tratamiento de residuos sólidos municipales, se deben considerar los riesgos que puede implicar adquirir una de estas tecnologías.

En la figura 4.2 de destacan dos categorías de riesgo tecnológico: Riesgo de proceso, riesgo de operación y las subcategorías correspondientes, las cuales fueron considerados propiamente como los criterios para valorar las tecnologías.

Figura 4.2. Cuadro de riesgos involucrados para evaluación de tecnologías.



Fuente: Ciceri, Hugo Norberto en: *Metodologías para evaluación y valuación de tecnología, segunda parte, Tecnologías nuevas o emergentes de riesgo medio y alto*. Maestría en Administración de la Tecnología, 2001, pp 32-58, Facultad de Química UNAM.

Capítulo 4. Selección de tecnología

A continuación se establecen los criterios que fueron considerados⁵.

Para la categoría de riesgo de proceso:

- Confiabilidad en pre tratamiento. Este aspecto se refiere a la confianza que muestra el sistema para proveer de RSM con características específicas en la alimentación de los procesos y que esto claro repercute en las condiciones y productos del proceso.
- Eficacia en el procesamiento de los RSM. Este aspecto nos evalúa la manera eficaz con que se procesan los RSM y la experiencia que han mostrado para hacerlo.
- Eficacia en la obtención del gas de síntesis. Este aspecto nos indica el volumen de gas de síntesis obtenido por tonelada de RSM procesada.
- Eficacia en la obtención de energía. En este aspecto se evalúa la eficacia que se tiene para convertir los RSM en energía. Se manejarán kWh obtenidos por tonelada de RSM procesada.

Para la categoría de riesgo de operación se tomarán los siguientes criterios:

- Experiencia demostrada: Este criterio califica cuál es la experiencia de la tecnología con los procesos de gasificación de RSM, ya que toma en cuenta la cantidad de instalaciones con que cuenta la tecnología y si es o no una tecnología probada comercialmente. Este aspecto es de los más importantes para dar seguridad en la tecnología que se estaría adquiriendo.
- Escalamiento de diseño. En este criterio se refiere a la capacidad que tiene la tecnología para llevar sus escalas de diseño al tamaño especificado, ya que muchas veces se tienen comportamientos inesperados en la operación de los equipos y procesos.
- Sistema de integración. El criterio se refiere a la habilidad para construir proyectos específicos que muestren una operación eficiente y confiable de los procesos. A su vez se evalúa la experiencia que se cuenta para integrar

⁵ Fuente: Ciceri, Hugo Norberto en: *Metodologías para evaluación y valuación de tecnología, segunda parte, Tecnologías nuevas o emergentes de riesgo medio y alto*. Maestría en Administración de la Tecnología, 2001, pp 32-58, Facultad de Química UNAM.

Capítulo 4. Selección de tecnología

componentes que abarcan el sistema de manejo de alimentación, unidad de conversión y poder para incrementar la eficiencia.

- Potencial de emisión de gases tóxicos. Es un criterio que considera el desempeño ambiental de la unidad de conversión en función de sus temperaturas, gas de síntesis/sistema de limpieza de gases de escape. De igual manera se contempla el cumplimiento de las normas específicas de los contaminantes emitidos por los procesos mismos.
- Subproductos y residuos de proceso. Se evaluará este aspecto para saber la utilidad que tienen estos subproductos y si estos pueden ser comerciables; además si tienen un impacto importante los residuos del proceso sobre el ambiente.

4.4 Metodologías de análisis multicriterio.

De acuerdo con la metodología mostrada anteriormente en la figura 4.1, nos indica que se debe de llevar a cabo la comparación de las tecnologías térmicas de interés. Para esto se propuso la utilización de la metodologías de análisis multicriterio. A continuación se hará una breve descripción de estas metodologías.

4.4.1 Metodología base para seleccionar la tecnología a utilizar.

La metodología base de análisis multicriterio es un método cualitativo en donde se lleva a cabo una evaluación matricial, la cual consiste básicamente en construir una matriz que contempla la consideración de los aspectos por los cuales serán evaluados cada una de las tecnologías seleccionadas.

Se propone un método objetivo, lo que por otra parte podría ser uno subjetivo. Brevemente, da los requisitos de una asignación particular entre las categorías. Cada categoría tiene un valor de 1 (poco satisfactorio) a 10 (excelente). También hay un factor de ponderación (peso), que se asigna a cada categoría. El valor global se obtiene sumando las valuaciones y multiplicando por los factores para cada opción.

Capítulo 4. Selección de tecnología

En un proceso, las personas hacen a veces una selección integrando todos los aspectos positivos y negativos de cada alternativa. Para la mayoría de las personas, es difícil quedarse sólo con el objetivo y escoger la selección global buena, sobre todo si las distintas opciones parecen iguales.

El procedimiento propuesto minimiza tales problemas dividiendo el caso en varias categorías que se analizan y valoran en cada momento. No sólo haciendo esto simplifica el proceso de la evaluación sino se ayuda a evitar las opiniones negativas o positivas que influyen demasiado en la decisión.

Los pasos a seguir para la construcción de la matriz de resultados multicriterio se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Metodología para la construcción de la matriz multicriterio.

Nº	Pasos a seguir	Descripción
1	Asignar peso o ponderación	En donde: $100 = \sum P_i$,
2	Selección de aspectos a ser tomados en cuenta	En este caso sólo serán tomadas las categorías como aspectos, para obtener algo más concreto y de fácil descripción a la hora de evaluar, además de que resulta más ilustrativo.
3	Asignar peso o ponderación a los aspectos considerados	A los aspectos seleccionados se les asignó la ponderación que llevarán en la evaluación.
4	Establecer escala de calificaciones	En este paso se establecieron las calificaciones que se utilizaran que pueden ser escalas del 0 al 10.
5	Calificar los aspectos considerados	La calificación se hizo tomando en cuenta la tabla del punto anterior y los datos de que se disponían. En este caso la calificación obtenida se describe dentro matriz de resultados
6	Generar matriz de resultados	Realización de la tabla multicriterio
7	Selección y recomendación de la tecnología	La selección y recomendación de la tecnología se hará de acuerdo a la tecnología que obtenga más puntos en ambas matriz construidas.

Fuente: Elaboración propia a partir de Collí Ramírez Juan, *Metodología para la selección de procesos*, Facultad de Química, UNAM, 2006.

Ya una vez definido los aspectos que se utilizaron para evaluar las tecnologías, una parte importante en el trabajo es la escala de valores como se puede observar en la tabla 4.3, que nos permitirá hacer una evaluación y posterior selección, de acuerdo a parámetros establecidos.

Tabla 4.3 Escala de valores numéricos para los aspectos a evaluar		
Escala del valor	Descripción general	Definición
10	Óptimo	Calificaciones superiores, aventajado en el diseño estándar.
9	Bueno	Mejores calificaciones excedido en el diseño estándar.
8	Mediano alto	No debilitado generalmente excedido en el diseño estándar.
7	Mediano	Poco debilitado, generalmente por debajo del diseño estándar.
6	Mediano bajo	Algo debilitado, por debajo de algunos estándares
5	Mediano muy bajo	Deficiente muy por debajo de algunos estándares.
4	Inadecuada	Muy deficientes, por debajo de los estándares.
3	Mala	Severamente deficiente, casi no tiene estándares.
2	Peor	Extremadamente deficiente, cercanamente inaceptable.
1	Insatisfactoria	Totalmente inaceptable.

Fuente: Robert L. Landis and James E. Hamilton, "Technique evaluates engineering alternatives", *Chemical Engineering*, (1984), October 1, 91.

4.4.1.1 Ventajas y desventajas de la metodología base.

Para poder conocer las limitaciones con que cuenta cada metodología hay que distinguir los puntos fuertes y débiles. A continuación serán enumerados estos puntos de la metodología base:

Ventajas

- Es un método que cuenta con objetividad. El método evita comparar las alternativas intencionalmente. En cambio, se juzgan los méritos de cada uno contra una norma predeterminada.
- Es un método sencillo que arroja buenos resultados, siempre y cuando se haga una buena evaluación de las alternativas a comparar.
- Se puede utilizar tanta información como se obtenga referente a datos cualitativos y cuantitativos para llevar a cabo la evaluación matricial.

Desventajas.

- Como es un método cualitativo depende de los aspectos que considere el evaluador y como los califique.
- Influye de manera importante los datos obtenidos que se consideran para la evaluación de alternativas

- Es un método estático que no puede predecir escenarios que se puedan presentar una vez que sea implementada la tecnología cuando se vea influida por ciertas variables como la tasa de interés.

4.4.2. Metodología *PROMETHEE & GAIA*.

La metodología *PROMETHEE & GAIA* es un método de carácter cuantitativo, utilizando los métodos de decisión multicriterio discreto *PROMETHEE* (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations), los cuales se encuentran incluidos dentro del Software "*Decision Lab*".

El método *PROMETHEE*, como técnica de decisión multicriterio, trata de establecer, mediante la evaluación en función de k criterios, f_1, f_2, \dots, f_k , una ordenación jerarquizada en el conjunto A de alternativas. La principal idea que subyace en su filosofía, consiste en enriquecer la relación de dominio existente entre las distintas alternativas, para lo cual desarrolla las siguientes etapas:

4.4.2.1 Definición del criterio generalizado

Esta fase requiere que a cada criterio f_j se le asocie un criterio generalizado, $p_j(x)$, el cual valorará la preferencia de una alternativa a respecto a una b como una función de la diferencia entre evaluaciones, $f_j(a) - f_j(b)$. Con el propósito de facilitar la elección de un criterio generalizado asociado a cada criterio, Brans et al (1984) proponen seis tipos diferentes (véase Figura 4.3), para cada uno de los cuales, el decisor deberá fijar, como máximo, el nivel de dos parámetros de claro sentido económico. Dichos parámetros son los siguientes: q (umbral que define el área de indiferencia), p (umbral que define el área de preferencia estricta) y s (parámetro que relaciona los valores de p y q).

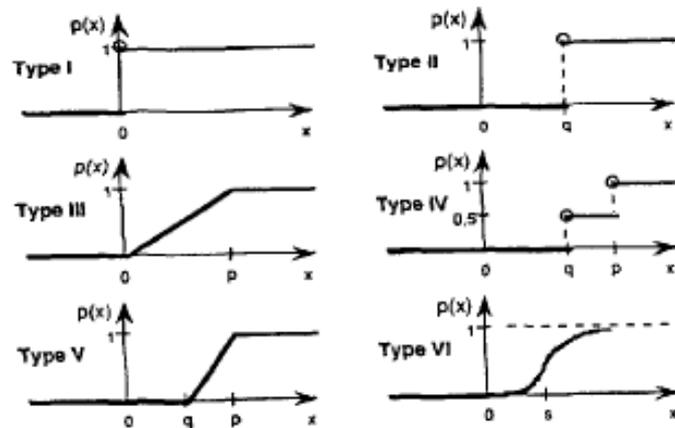


Figura 4.3. Tipos de criterios generalizados.

4.4.2.2 Construcción del índice de preferencia multicriterio

El paso siguiente consiste en definir un índice de preferencia multicriterio, $\pi(a,b)$, que mida el grado en que a es preferido a b en todos los criterios:

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^k W_j P_j(a,b)$$

Donde $w_j > 0$ ($j=1, \dots, k$) es el peso de importancia asociado al criterio j, siendo

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

4.4.2.3 Adopción de la decisión final

Se consideran dos flujos de ordenación, el saliente y el entrante, que reflejan el grado en que una alternativa i domina o es dominada por las restantes, y que se definen respectivamente del siguiente modo:

$$\phi_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(i, x)$$

$$\phi_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(i, x)$$

El flujo de orden saliente representa el carácter dominante de una alternativa, su poder dominador, por ello será mejor aquella alternativa que tenga mayor flujo de orden saliente.

El flujo de orden entrante representa la debilidad de una alternativa, en tanto es dominada por las demás, así será mejor aquella alternativa que tenga un flujo de orden entrante más pequeño.

A través de estos dos flujos se puede definir un orden parcial entre las alternativas (Método *PROMETHEE I*), pudiéndose producir incomparabilidades entre ellas.

Para obtener una ordenación total de las alternativas (Método *PROMETHEE II*) se define el denominado flujo neto de orden:

$$\Phi_{(a)} = \varphi_{(a)}^+ - \varphi_{(a)}^-$$

de modo que, una alternativa a superará a otra b, si $\varphi_a > \varphi_b$ y serán indiferentes si

$$\Phi_{(a)} = \Phi_{(b)}$$

Este flujo de orden neto elimina el problema de las incomparabilidades entre alternativas, aunque se pierda parte de la información proporcionada por los anteriores flujos.

4.4.2.4 Ventajas y desventajas de la metodología *PROMETHEE & GAIA*.

Como se dijo anteriormente la metodología *PROMETHEE & GAIA* cuenta con varias herramientas que le permiten al evaluador dar mejores argumentos para poder llevar a cabo la toma de decisión que mejor satisfaga el problema a resolver. Sin embargo es necesario conocer cuáles son los puntos fuertes y débiles de esta metodología, que a continuación serán enumeradas:

Ventajas

- Se puede obtener de manera sencilla una ordenación jerarquizada de las alternativas involucradas en el problema. Es un método sencillo que arroja buenos resultados, siempre y cuando se haga una buena evaluación de las alternativas a comparar.
- Incorpora diversas funciones de preferencia que se pueden asociar a cada uno de los criterios propuestos y cuenta con herramientas que permite realizar un adecuado análisis de sensibilidad.
- Se puede tener una visualización del problema a través del plano GAIA, en donde se puede apreciar los conflictos que existen entre los criterios

Capítulo 4. Selección de tecnología

- Esta metodología ha sido incorporada a un software que permite manejar múltiples escenarios, es decir, toma en cuenta diversos puntos de vista lo que propicia a los evaluadores en la toma de decisión.

Desventajas.

- Como el método lleva a cabo la comparación de alternativas por pares en función del dominio o debilidad que ejercen una sobre la otra, puede existir el caso de sean incomparables por el método de clasificación parcial *PROMETHEE I*.
- Se requiere de datos numéricos lo más precisos posibles para que se pueda calcular la ordenación jerarquizada de las alternativas. Entre más complejo sea el problema un valor atribuido a un criterio puede influir significativamente en la decisión final.
- Es un método estático que no puede predecir escenarios que tengan probabilidad de presentarse una vez que sea implementada la tecnología, cuando se vea influida por ciertas variables como la tasa de interés.

4.5 Aplicación de las metodologías propuestas.

Se llevará a cabo en este apartado la aplicación de las metodologías *base* y *PROMETHEE & GAIA* respectivamente para poder tener una noción más clara de los fundamentos en los cuales está basada cada metodología.

Las metodologías se utilizarán con la finalidad de seleccionar la tecnología térmica que pueda tratar los residuos sólidos municipales originados en nuestro país.

Las tecnologías térmicas que serán evaluadas son:

- *Integrated Plasma Gasification Combined Cycle (IPGCC)* de Solena Group
- *Direct Melting System (DMS)* de Nippon Steel
- *Plasma Enhance Melter (PET™)* de Integrated Environmental Technologies(IET)
- *TwinRec* de Ebara Corporation

4.5.1 Resolución mediante metodología base.

Hay que señalar que las metodologías ocuparon la misma cantidad de información para construir la matriz de resultados multicriterio. Resumiendo el método base, se asignaron calificaciones con una escala desde el 0 al 10 para evaluar las tecnologías como se puede ver en la tabla 4.3.

Después siguiendo el procedimiento planteado, en la tabla 4.4 se puede observar el peso de ponderación asignado a cada uno de los aspectos planteados en función de la importancia y prioridad que representan en la evaluación.

Tabla 4.4		
Selección de aspectos o categorías así como factor de valoración o ponderación		
N°	Aspectos o categorías	Factor de valoración o ponderación
		WFi
1	Confianza en pretratamiento	5
2	Eficacia en procesamiento de RSM	12
3	Eficacia en la obtención del gas de síntesis	12
4	Eficacia en la obtención de energía	15
5	Experiencia demostrada	15
6	Escalamiento de diseño	12
7	Sistema de integración	12
8	Potencial emisión de gases tóxicos	10
9	Subproductos y residuos del proceso	7
Total = Σ WFi, este valor debe ser igual a 100		$\Sigma = 100$
Fuente: Elaboración a partir de Hugo Ciceri, 2006.		

Con todos los aspectos anteriores, ahora se puede generar la matriz de resultados en la tabla 4.5, que nos permitirá evaluar y después seleccionar la metodología. En esta tabla se muestran todas las categorías que se evaluarán, su ponderación, su valor y además el resultado de selección de tecnologías térmicas para el tratamiento de RSM.

Tabla 4.5					
Evaluación de la matriz obtenida por las tecnologías térmicas seleccionadas					
Aspectos	Factor de valoración	Ebara	Nippon Steel	Integrated Environmental Technologies	Solena Group
	WFi	Calificación * WiFi	Calificación * WiFi	Calificación * WiFi	Calificación * WiFi
Confianza en pretratamiento	5	9*5 = 45	8*5 = 40	10*5= 50	10*5=50
Eficacia en procesamiento de RSM	12	9*12 = 108	9*12 = 108	10*12= 120	10*12=120
Eficacia en la obtención del gas de síntesis	12	10*12 = 120	8*12 = 96	10*12 = 120	10*12=120
Eficacia en la obtención de energía	15	9*15 = 135	8*15 = 120	9*15 = 135	10*15=150
Experiencia demostrada	15	9*15 = 135	10*15 = 150	6*15 = 90	5*15=75
Escalamiento de diseño	12	10*12 = 120	9*12=108	7*12=84	7*12=84
Sistema de integración	12	9*12 = 108	8*12 = 96	8*12 =108	9*12=108
Potencial emisión de gases tóxicos	10	9*10 = 90	7*10 = 70	9*10 = 90	10*10=100
Subproductos y residuos del proceso	7	8*7 = 56	7*7 = 49	10*7 = 70	9*7=63
Total de la ponderación (debe ser = 100)	$\Sigma p_i=100$				
Total de cada tecnología		917	837	867	870

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4. Selección de tecnología

De la tabla anterior, se puede observar las calificaciones obtenidas por las tecnologías de interés. La tecnología seleccionada de acuerdo a esta metodología es la tecnología Ebara con un total de 917 puntos, seguida muy de cerca por Solena Group con un total de 870 puntos, así como en tercer lugar Integrated Environmental Technologies con 867 puntos y por último la de Nippon Steel con 837 puntos.

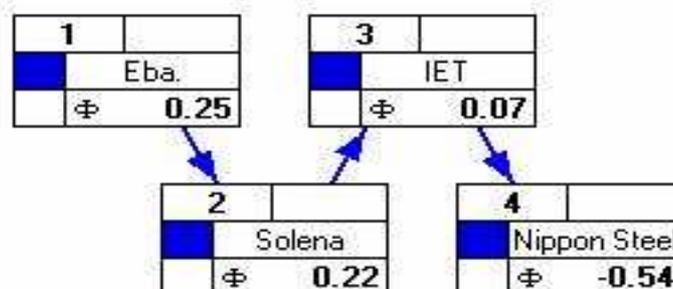
Hay que mencionar que los resultados obtenidos por esta metodología no son determinantes para seleccionar la tecnología y por lo que se contempló el uso de la metodología *PROMETHEE & GAIA* que a continuación será mostrada.

4.5.2 Resolución con metodología *PROMETHEE & GAIA*

A esta metodología se le asignaron los mismos pesos de ponderación con que fueron evaluados los aspectos en la metodología base y también se utilizaron los mismos datos con que se construyó la matriz multicriterio y los cuales fueron introducidos en el software *DecisionLab*. Las funciones de preferencia que se asignaron a cada uno de los criterios fueron de Tipo *Usual* y se consideró una maximización de todos los criterios para evitar confusiones en el tipo de evaluación que se realizó.

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el empleo del método *PROMETHEE II*, que nos permite comparar las tecnologías tomando en cuenta el flujo de neto de orden Φ , el cual elimina el problema de las incomparabilidades que puedan generarse por estas tecnologías.

Figura 4.4. Clasificación total *PROMETHEE II*.



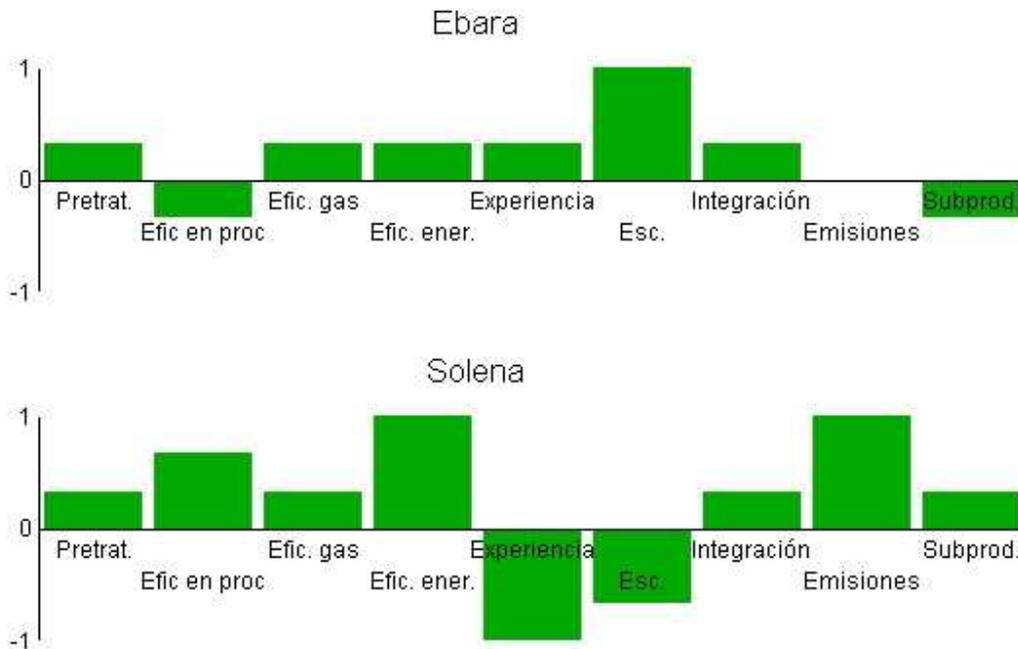
Capítulo 4. Selección de tecnología

Tomando en consideración el valor del flujo neto(Φ), también se puede comprender la magnitud con que una compañía supera a otra, como puede observarse en la figura 4.4, en donde se puede apreciar como la tecnología Ebara no aventaja por mucho a la tecnología Solena Group y por consiguiente se hará un análisis de sensibilidad más adelante.

En el software especializado *PROMETHEE & GAIA* se encuentra una herramienta denominada *Perfiles* (Profiles), esta herramienta es muy útil al tratar de visualizar las diferencias entre las distintas tecnologías térmicas seleccionadas para el tratamiento de RSM. Esta herramienta presenta mediante un grafico de barras, los diferentes criterios introducidos en la selección de la mejor alternativa (en el eje de las abcisas), el valor que se encuentra en el eje de las “ordenadas”, indica cual es el valor calculado de ese criterio tomando en cuenta el valor introducido inicialmente en la calificación del criterio, así como la ponderación del mismo. La herramienta *Perfiles*, permite comparar dos alternativas al mismo tiempo, pudiendo de esta forma el observar, de una manera más fácil, las diferencias entre ambas tecnologías.

Como se puede constatar en la figura 4.5, en la tecnología de gasificación convencional Ebara, se tienen muchos más valores positivos que la tecnología Solena Group. Se puede observar que la experiencia pesó de manera importante en la comparación de las tecnologías, así como Ebara tiene aspectos que lo repercuten como es el caso de las emisiones y los subproductos del proceso.

Figura 4.5. Perfiles de las tecnologías



A continuación se llevará a cabo un análisis de sensibilidad con la finalidad de visualizar un panorama amplio del estudio comparativo de las tecnologías estudiadas y que a su vez nos brinde más argumentos para obtener las conclusiones pertinentes.

4.5.3 Análisis de sensibilidad.

Una vez realizado un análisis inicial decidimos realizar un análisis de sensibilidad de los pesos. De esa manera, para cada criterio, vemos en qué intervalo se pueden mover los mismos, de forma que la solución del problema siga siendo la misma. Lo que sí es cierto es que cuanto mayor sean los intervalos, más estables serán las ponderaciones.

Para la realización del análisis de sensibilidad se utilizó la metodología *PROMETHEE & GAIA* dado el fácil manejo de datos con que cuenta el software y a su vez porque nos permite obtener resultados más precisos con la herramienta *pesos cambiantes*, la cual nos permite visualizar los cambios que se presentan cuando se cambian los pesos de ponderación de los criterios propuestos.

Capítulo 4. Selección de tecnología

Se considerarán 3 escenarios distintos con sus respectivos pesos de ponderación (excluyendo la evaluación anterior) a cada uno de los aspectos considerados en la comparación.

A continuación en las tablas siguientes se mostrarán los resultados obtenidos en la evaluación de cada una de las tecnologías en cada uno de los escenarios propuestos con sus respectivas ordenaciones con el método *PROMETHEE II*.

Tabla 4.6. Resultados obtenidos en *DecisionLab* para el escenario 1.

Nº	Aspectos considerados	Peso del factor considerado	Evaluación obtenida por tecnologías
1	Confianza en pretratamiento	9	Ebara está mejor posicionado, seguido de Solena, IET y Nippon Steel respectivamente
2	Eficacia en procesamiento de RSM	12	
3	Eficacia en la obtención del gas de síntesis	12	
4	Eficacia en la obtención de energía	12	
5	Experiencia demostrada	15	
6	Escalamiento de diseño	10	
7	Sistema de integración	10	
8	Potencial emisión de gases tóxicos	10	
9	Subproductos y residuos del proceso	10	

Fuente: Elaboración propia.

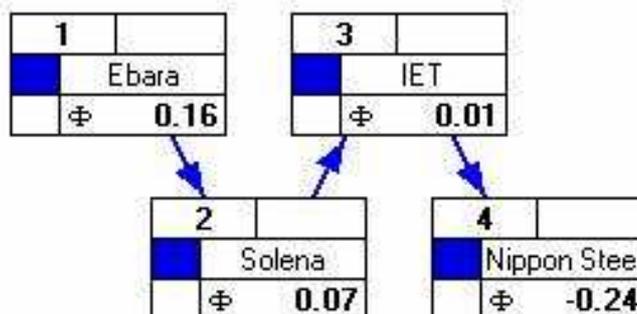


Figura 4.6 Resultados obtenidos por PROMETHEE II en escenario 1

Como se puede observar en el escenario 1 se encuentra mejor posicionada la compañía Ebara con respecto a las demás compañías. El aspecto referente a la experiencia demostrada se le dio un mayor peso de ponderación, dado que es un aspecto crítico que debe ser tomado en cuenta cuando se va a adquirir una nueva

Capítulo 4. Selección de tecnología

tecnología. Sin embargo, aspectos como eficacia en diversas índoles tomaron un peso que contribuyó de manera considerable en este escenario también.

Tabla 4.7 Resultados obtenidos en *DecisionLab* para el escenario 2.

Nº	Aspectos considerados	Peso del factor considerado	Evaluación obtenida por tecnologías
1	Confianza en pretratamiento	10	Ebara está mejor posicionado, seguido muy de cerca por Solena, IET y Nippon Steel respectivamente
2	Eficacia en procesamiento de RSM	15	
3	Eficacia en la obtención del gas de síntesis	15	
4	Eficacia en la obtención de energía	15	
5	Experiencia demostrada	9	
6	Escalamiento de diseño	9	
7	Sistema de integración	9	
8	Potencial emisión de gases tóxicos	9	
9	Subproductos y residuos del proceso	9	

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar como en el escenario 2 es uno de los más críticos, ya que la categoría de riesgos de proceso que engloba los aspectos referentes a la eficacia jugaron un papel importante para que las compañías *Ebara* y *Solena* obtuvieran perfiles similares como se observa en la figura 4.7 y cabe aclarar que al aspecto de experiencia no se le dio mucha prioridad en este escenario para visualizar posibles cambios en el orden de jerarquización de las alternativas.

Esto se justifica en gran parte a las altas calificaciones obtenidas por *Solena* en aspectos referentes a eficacia para la evaluación de resultados de la matriz multicriterio. Este escenario se puede considerar como crítico ya que a pesar de asignar pesos de ponderación a ciertos aspectos que favorecen a *Solena* en sus calificaciones, *Ebara* obtuvo mejores resultados como se puede apreciar en la figura 4.8.

Figura 4.7 Resultados obtenidos con herramienta <<Pesos cambiantes >> en escenario 2.

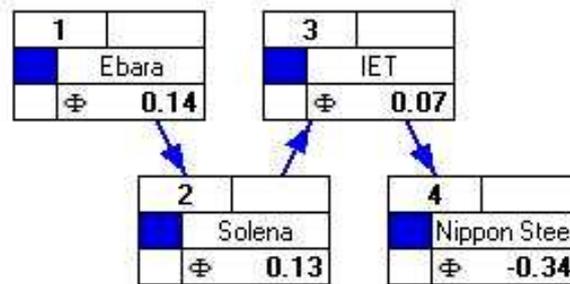
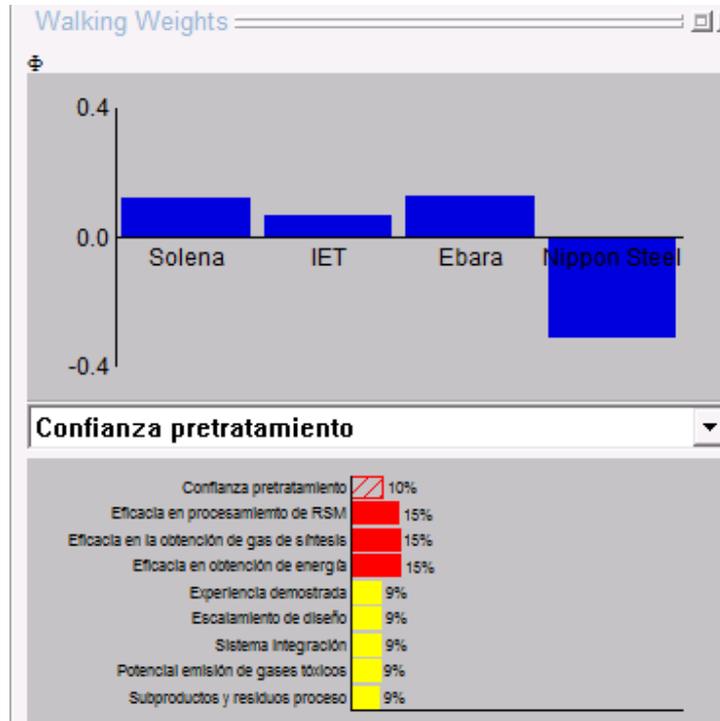


Figura 4.8 Clasificación Total PROMETHEE II en escenario 2

Tabla 4.8 Resultados obtenidos en *DecisionLab* para el escenario 3.

N°	Aspectos considerados	Peso del factor considerado	Evaluación obtenida por tecnologías
1	Confianza en pretratamiento	10	Ebara está mejor posicionado, seguido de Solena, IET y Nippon Steel respectivamente
2	Eficacia en procesamiento de RSM	10	
3	Eficacia en la obtención del gas de síntesis	10	
4	Eficacia en la obtención de energía	10	
5	Experiencia demostrada	20	
6	Escalamiento de diseño	10	
7	Sistema de integración	10	
8	Potencial emisión de gases tóxicos	10	
9	Subproductos y residuos del proceso	10	

Fuente: Elaboración propia.

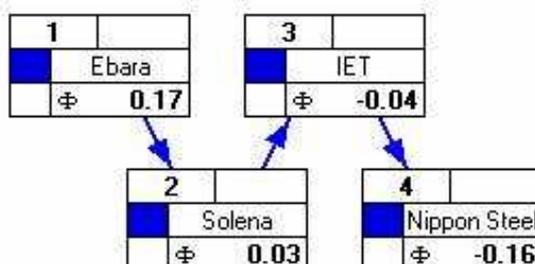


Figura 4.9 Clasificación Total PROMETHEE II en escenario 3

Este último escenario distribuye de manera semejante los pesos de la mayoría de los aspectos considerados a excepción de la experiencia demostrada que se le dio un mayor peso de ponderación que en el planteado en el escenario 1, dado que es uno de los aspectos clave como se mencionó anteriormente.

4.6 Comparación de resultados.

Es importante resumir los resultados obtenidos con ambas metodologías para visualizar si existen diferencias significativas y a su vez saber que tanto influirían en la toma de decisión. Hay que señalar que ambas metodologías ocuparon la

Capítulo 4. Selección de tecnología

misma cantidad de información con la cual fue construida la matriz multicriterio para llevar a cabo la evaluación de los criterios seleccionados en el punto 4.2.

Para esto tomaremos como referencia los pesos de ponderación que se les asignó a los criterios resumidos anteriormente en la tabla 4.4.

Tabla 4.9 Resultados obtenidos con metodologías.

Tecnología térmica	Posición obtenida con metodología base	Posición obtenida con metodología PROMETHEE & GAIA
<i>Ebara Corporation</i>	1	1
<i>Solena Group</i>	2	2
<i>Integrated Environmental Technologies</i>	3	3
<i>Nippon Steel</i>	4	4

Fuente: Elaboración propia.

Comparando la tabla de resultados obtenidos por el método base que es donde uno asigna las calificaciones que considera pertinentes el evaluador a las compañías participantes y el otro método desarrollado en el software *DecisionLab* que engloba la toma de decisiones multicriterio, se puede observar que se obtuvieron los mismos resultados y a su vez haciendo uso del análisis de sensibilidad en donde se contemplaron tres escenarios distintos al de referencia se encontró que la compañía mejor posicionada con respecto a las otras fue *Ebara Corporation*. Sin embargo se observó que en el escenario dos al darle mayor peso a aspectos relacionados con la eficacia y darle un menor peso a la experiencia nos arrojó resultados semejantes entre las tecnologías *Solena Group* y *Ebara Corporation*.

4.7 Conclusiones.

En la actualidad es de importancia conocer el tipo de tecnologías y empresas que predominan en el mercado de tecnología, ya que del conocimiento de estas, podemos hacer una selección y análisis de las alternativas más factibles y disponibles que se adecuen a la resolución de nuestro problema, el cual es resolver el tratamiento de los RSM. De acuerdo a las metodologías propuestas donde se pudo construir la matriz de resultados de carácter multicriterio nos

Capítulo 4. Selección de tecnología

permitió recomendar y seleccionar la tecnología térmica más conveniente, que en este caso resultó ser la compañía *Ebara*, que proviene de Japón. Es importante considerar que los pesos de ponderación asignados son importantes y por esta razón se realizó el análisis de sensibilidad que confirmó que *Ebara* se encuentra mejor posicionado que las demás compañías en cada uno de los escenarios.

Hay que señalar que ambas metodologías son estáticas y éste es uno de sus puntos débiles. En las metodologías no se puedan visualizar escenarios en las que las tecnologías se pueden ver influidas por variables que van variando con el tiempo como la tasa de interés. Este tipo de análisis son importantes ya que nos da un mejor panorama porque se están contemplando los aspectos macro y microeconómicos.

Ebara fue seleccionada en parte porque cuenta con una amplia experiencia en el mercado y es una tecnología probada comercialmente. *Ebara* cuenta en la actualidad con catorce plantas en funcionamiento. Esta es una de las desventajas en la gasificación por plasma ya que lleva poco tiempo de aplicación para el tratamiento de RSM y no ha demostrado ser competitiva en el mercado. Tal vez en unos años esta tecnología consiga la aceptación del público, ya que es una tecnología prometedora por las ventajas que presenta son muchas como es el caso del nulo pre tratamiento que se le tiene que hacer a los RSM, así como una obtención considerable de energía que lo permiten ser autosuficientes de energía en la misma planta siempre y cuando se construyan las de mayor capacidad de procesamiento.

Hay que mencionar que un criterio que no se tomó en cuenta y que es de gran importancia fue el económico, debido a la falta de información con que se cuenta en algunas tecnologías y también porque no se cuentan con datos precisos que nos permitan llevar a la selección de la tecnología pertinente. La tecnología de *Ebara* representa una solución al tratamiento de RSM a la zona metropolitana de nuestro país, ya que se generan en promedio anualmente cerca de 14,000 toneladas diariamente y se podría tratar todo esos RSM con este proceso que cuenta con experiencia en tratamiento de grandes volúmenes de RSM, que van desde las 100,000 toneladas hasta las 500,000 toneladas anuales.

Capítulo 5

Conclusiones generales

Conclusiones generales

A partir de las metodologías examinadas, las cuales fueron aplicadas a un grupo de tecnologías previamente seleccionadas se encontró que el método *base* con carácter cualitativo exhibe un comportamiento similar al método cuantitativo *PROMETHEE*. De acuerdo a los resultados presentados por ambas metodologías se observa que la ordenación jerarquizada de las alternativas tecnológicas fue la misma en donde la compañía *Ebara Corporation* está mejor posicionada con respecto a las demás compañías. Por consiguiente podemos afirmar que al emplear la metodología *PROMETHEE* se está validando la metodología *base* por ser un método más robusto que permite realizar un análisis más completo y a su vez nos permite visualizar de manera sencilla la comparación de las alternativas tecnológicas.

Es de suma importancia realizar un análisis de sensibilidad para asegurarse de que la opción elegida haya sido la correcta. Para esto se propusieron distintos escenarios de acuerdo a las prioridades que se le dan a los aspectos con los cuales fueron evaluadas cada una de las tecnologías involucradas en el proceso de selección y así de esta manera ver la estabilidad que muestra la solución encontrada.

Hay que señalar que ambas metodologías son estáticas y no se puedan visualizar escenarios en las que las tecnologías se pueden ver influidas por variables que van variando con el tiempo como la tasa de interés. Este tipo de análisis son importantes ya que nos da un mejor panorama porque se están contemplando los aspectos macro y microeconómicos. Este tipo de análisis permitiría al evaluador tener más parámetros para decidir si es el momento apropiado de reemplazar una tecnología existente o adquirir una nueva.

En cuanto al objetivo planteado en la tesis fue logrado ya que era seleccionar de una forma racional la tecnología térmica que mejor cumpliera con la necesidad de tratar RSM, aunque hay que hacer notar que hubo ausencia de información de algunas tecnologías estudiadas y que no repercutieron significativamente los resultados obtenidos. Por lo anterior, no implica que otros tratamientos que se le da a los RSM como los biológico- químicos y los físicos no sean viables puesto que el punto de partida para el desarrollo de la tesis fue hacer notar que las

Conclusiones generales

tecnologías como la incineración y los rellenos sanitarios han demostrado ser tecnologías de cierta manera obsoletas y no funcionales por el tipo de problemas que acarrearán al medio ambiente. A diferencia de la incineración, en la gasificación gracias al intervalo de temperaturas que maneja, remueve los materiales volátiles de hidrocarburos sólidos o líquidos, limita la formación de dioxinas, furanos y grandes cantidades de SOx y NOx, y los convierte en un gas de bajo o medio poder calorífico, el volumen del gas de síntesis obtenido es bajo y por consiguiente requiere menor tratamiento la limpieza del gas.

La tecnología de gasificación convencional *Ebara* que fue seleccionada a través de las metodologías propuestas representa una alternativa tecnológica viable que resolvería la problemática relacionada con la administración y eliminación de los RSM originados en sitios sumamente poblados como las áreas metropolitanas del país y representa un costo aproximado a 570 dólares por tonelada procesada y a su vez se requiere una inversión que oscila por los 67 millones de dólares. Además una ventaja importante es la generación de fuentes renovables de combustible y la generación de energía eléctrica a partir del gas de síntesis obtenido proveniente de los RSM que tiene un rendimiento cercano al 50% en recuperación de energía en el proceso. Inclusive ya no se tendría que hacer labor en la separación de los RSM, ya que para Japón representa un costo elevado contratar personal que se encargue de hacer estas funciones. En cambio, la situación en el país es distinta y nos beneficiaría en gran parte ya que si se adoptara la medida de separar aquéllos RSM con alto contenido energético como plástico y cartón se obtiene una mayor cantidad de gas de síntesis y por lo tanto se generaría una cantidad importante de generación eléctrica.

En cuanto a los proveedores de tecnologías de gasificación por plasma existentes no ofrecen al cliente la seguridad de que se está adquiriendo una tecnología fiable dado que no cuentan con la suficiente experiencia en el mercado y también hay que resaltar que hay ausencia de datos sobre parámetros claves o que no han podido ser verificados, lo que implicaría correr un riesgo alto si se eligiera esta tecnología.

Conclusiones generales

Es importante hacer notar que si se tomara en cuenta la adquisición de la tecnología *Ebara* se podrían obtener beneficios por la comercialización de los bonos de carbono a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio que hoy en día es una oportunidad de obtener financiamiento adicional proveniente de países desarrollados para que puedan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como está estipulado en el Protocolo de Kyoto. Aunado a todo esto, hay que poner como prioridad el beneficio ambiental que traería consigo la tecnología, ya que se estaría evitando la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono, así como las dioxinas y furanos que son perjudiciales para la salud. Además, la rentabilidad del proyecto aumentaría si se considerara la comercialización del subproducto slag que tiene muchos usos en la rama constructiva, sin olvidar que dependiendo de la composición y cantidad de RSM que se estén procesando se podría ser autosuficiente en energía eléctrica e incluso de ser el caso, obtener ingresos adicionales por la venta de los excedentes de energía generados.

Hoy en día, las tecnologías de gasificación convencional han sido implementadas en muchas partes del mundo y no sólo para tratar RSM sino también para tratar residuos industriales, médicos y peligrosos, lo que nos habla de la gran flexibilidad con que cuenta este tipo de tecnologías que han logrado su aceptación y sobretodo los cambios positivos que se tendrían al adquirir esta tecnología como es la reducción de RSM, el bienestar social, la minimización de la contaminación así como el cambio de hábitos y toma de conciencia de la población.

Basándose en los beneficios que la tecnología presenta, se puede decir que su implementación en nuestro país es viable, sin embargo para que esta tecnología pueda ser implementada en México, se debe de exponer ante las autoridades competentes, como son: la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Instituto Nacional de Ecología, la Procuraduría Federal del Medio Ambiente, la Secretaría de Energía, así como a las gubernaturas de cada estado.

Bibliografía

1. Aguilar Cruz Adriana, Contreras Durán José Javier, *Beneficios económicos, ambientales y sociales asociados al uso de tecnologías de gasificación en el tratamiento de residuos sólidos urbanos en México*, Tesis de grado, Facultad de Química, UNAM, 2008.
2. Alamada Power & Telecom, *Investigation into municipal solid waste gasification for power generation*, Advanced Energy Strategies Inc, Mayo 2004.
3. Almanza Jorge, *La comercialización internacional de bonos de carbono ¿Negocio o solución?*, Tesis de grado, Maestría en Ciencias de la Administración, UNAM, 2008.
4. Appendices, *Evaluation of conversion technology processes and products*. University of California. 2004.
5. Aversano Nicolás, Temperini Tiziana, *El calentamiento global: bonos de carbono, una alternativa, Modelización y Simulación de Sistemas Económicos*, Diciembre 2006.
6. Ávila Luis Medina, *Calentamiento global y bonos de carbono*, Págs. 1-17.2008.
7. Bilder, Sebastián, “Un análisis económico e institucional de los bonos de carbono”. Tesis de grado, Lic. en Economía, UNS. Marzo 2006.
8. Blanco Sánchez, Paula Helena, *Producción de gas de síntesis por medio de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico a partir de Residuos Sólidos Urbanos*, Tesis de grado, Facultad de Química, UNAM, 2008.
9. Boerrigter H., *Implementation of thermal processes for feedstock recycling of bromine and antimony, with energy recovery, from plastics waste of electrical and electronic equipment (WEEE)*, Unit ECN Biomass of the Netherlands Energy Research Foundation (ECN), Noviembre 2000.
10. Calaminus, Bernd y Stahlberg, R., “Continuous in-line gasification/vitrification process for thermal waste treatment: process technology and current status of projects”, *Waste Management*, 18(1998), 547-556.
11. Castillo M., Edgar Fernando; Cristancho, Diego Edison y Arellano A., Víctor, “Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes”, *Waste Management*, 26(2006), 546-556.

12. Cedzynska, Kolacinski, et. al, *Plasma vitrification of waste incinerator ashes*, Technical University of Lodz, Polonia, sin fecha.
13. Ciceri, Hugo Norberto en: *Metodologías para evaluación y valuación de tecnología*, segunda parte, *Tecnologías nuevas o emergentes de riesgo medio y alto. Maestría en Administración de la Tecnología*, 2001, pp 32-58, Facultad de Química UNAM.
14. Collí Ramírez Juan, *Metodología para la selección de procesos*, Tesis de grado, Facultad de Química, UNAM, 2006.
15. Consonni, S; Giugliano, M y Grosso, M, "Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part A: Mass and energy balances", *Waste Management*, 25(2005), 123-135.
16. Chang, Ni- Bin; Davila, Eric; Dyson, Brian y Brown, Ron, "Optimal design for sustainable development of a material recovery facility in a fast- growing urban setting", *Waste Management*, 25(2005), 833-846.
17. Consonni, S.; Giugliano, M. y Grosso, M., "Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part B: Emission and cost estimates", *Waste Management*, 25(2005), 137-148
18. Cortés, S. (2006). "Las Soluciones tecnológicas para el aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos". <http://www.fundacionenergia.es/> (Consulta: Septiembre, 2007).
19. Damberger Thomas A., *Plasma pyrolysis*, HI Disposal Systems, Febrero 1999.
20. Do Robert T., United States. Patent application ser No 6,987,792, applicant. Solena Group "*Plasma Pyrolysis ,Gasification and Vitrification of Organic Material*", Enero 2006.
21. Dubois Maarten, Martín González Ana María, *Municipal solid waste treatment in the EU*, Environmental Studies, Aarhus University, 2004.
22. Ebara Corporation, *MSW Treatment in Japan & Ebara's MSW Treatment Technologies*, International Process and Technology Innovations for Effective Waste Management (A&WMA), Mississauga, Ontario, Canada Feb. 2007.
23. Fujimura H., Oshita T. and Naruse K., *Fluidized -bed gasification and slagging combustion system*, Ebara Corporation, Mayo 2001.

24. FUNDACIÓN para estudios sobre la energía. Fundación española dedicada al análisis de fuentes alternas de energía. <http://www.fundacionenergia.es/> (Consulta: Agosto, 2007).
25. Garibaldi Fernando, Cambio Climático y Desarrollo Sustentable: Ahorro de energía. SENER, Diciembre 2002.
26. Georgiev, Ivan B. y Mihailov, Boris I., "Some general conclusions from the results of studies on solid fuel steam plasma gasification", *Fuel*, 71(1992), 895-901.
27. Gil, D. J. (2006). "Valoración energética de la fracción de combustible de los RSU". Centro de tratamiento integral de residuos "Las Lomas". Presentación. Urbaser. <http://www.upcomillas.es/> (Consulta: Septiembre, 2007).
28. Grand Mariana Conte, El cambio climático y el mercado de bonos de carbono. Seminario de Negocios. Universidad del ECEMA, consultada el 27 de octubre de 2008.
29. Inclán Ubaldo, *Mercado de bonos de carbono y sus beneficios potenciales para proyectos en México*, SENER, Junio 2005.
30. Integrated Environmental Technologies (IET), *Environmental Technology Verification Report for the Plasma Enhanced Melter (#40633)*, Approval Report, January 2002.
31. Integrated Environmental Technologies (IET), *Application for Medical Waste Treatment Technology Approval Report*, January 2003.
32. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). México. Estadísticas. <http://www.inegi.gob.mx> (Consulta: Julio, 2009).
33. Jaraysi, Massimino, Domingo, et al; *Mixed waste facility risk assessment for a commercial plasma – bases gasification and vitrification system*, WM99 Oral session 53, Marzo 1993.
34. J.P. Brans and B. Mareschal. BANK ADVISER: Un syst`eme inter-actif multicrit`ere pour l`evaluation financi`ere des entreprises `a l`aidedes m`ethodes PROMETHEE. *Actualit`e Economique*, 68(4), 1992.
35. J.P. Brans, C. Macharis, and et al. Combining multicriteria de-cision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure. *European Journal of Operational Research*, 109(2):428–441, 1998.

36. J.P. Brans, Bertrand Mareschal, Chapter 1. PROMETHEE methods, págs. 1–31. Presses de l'Université Laval, Québec, Canada, 2001.
37. Kimberly Link Wills, *Plasma power*, Georgia Tech Alumni Online, 2002.
38. Kumar Sudhir, Technology options for municipal solid waste-to-energy Project, Maharashtra Energy Development, TERI Information Monitor on Environmental Science, Volume 5, Número 1 (Junio 2000).
39. Lagerkvist, Anders, "Academic research on solid waste in Sweden 1994-2003, *Waste Management*, 26(2006), 277-283.
40. Lapa, N.; Santos Oliveira, J.F.; Camacho, S.L. y Circeo, L.J. "An ecotoxic risk assessment of residue materials produced by the plasma pyrolysis/vitrification (PP/ V) process", *Waste Management*, 22(2002), 335-342.
41. Macdonald Mott, County Surrey, *Review of plasma arc technology*, Southampton, Agosto 2008.
42. Multi-recovery from waste in a novel compound shaft-reactor-plasma-mixing-destruction-chamber approach, *Hetland and Jynum*, Julio 2001.
43. Nippon Steel, *Direct Melting System for Recycling (shaft furnace type gasification and melting furnace)*, Nippon Steel, Release February 2002.
44. Nippon Steel Engineering Co., *Direct Melting System*, Nippon Steel, Release.
45. Nippon Steel, *Nippon Steel Environmental Report 2002*, November 2002.
46. NMX-AA-022-1985. Protección al ambiente- contaminación del suelo-residuos sólidos municipales- selección y cuantificación de subproductos. Diario Oficial de la Federación.
47. NMX-AA-033-1985. Protección al ambiente- contaminación del suelo-residuos sólidos municipales- determinación del Poder Calorífico Superior. Diario Oficial de la Federación.
48. NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental- Incineración de Residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Diario Oficial de la Federación.
49. Plasma Arc Systems, *CMPS & F – Environment Australia, Appropriate technologies for treatment of scheduled wastes*, Review report # 7, November 1997.

50. Plasma Arc Technologies, *Construction engineering & management*, Purdue University, Junio 2000.
51. Plasma gasification waste treatment technology, *White Paper*, Resorption Canada Limited, Abril 2001.
52. Quapp W. J., D. Lamar and N. Soelberg; *Waste Gasification – Test Results From Plasma Destruction of Hazardous, Electronic and Medical Wastes*. Integrated Environmental Technologies, LLC, May 2003.
53. Quapp W. J., Surma Jeffrey E. and Dejaiffe Robert, *Production of Recycled Products from Coal Ash Using a Plasma Enhanced Melter*, International ash utilization symposium, center for applied energy research, University of Kentucky, paper # 101, 2001, Integrated Environmental Technologies, LLC, 2007.
54. Quapp William J, *General description of plasma enhanced melter*, White paper, Integrated Environmental Technologies, Inc, Septiembre 2002.
55. Ramos Oddet, *Trabajo de investigación sobre el estudio de la tecnología Nippon Steel para el tratamiento de RSM y recuperación de energía*, 2008.
56. Robert L. Landis and James E. Hamilton, “Technique evaluates engineering alternatives”, *Chemical Engineering*, (1984), October 1, 1991.
57. Selinger A., Steiner Ch; TwinRec gasification and ash melting technology- now also established for municipal waste, *WASTE 2003: 4th Int. Symposium on Waste Treatment Technologies - Sheffield*, 29 June - 2 Julio 2003.
58. Shibaiki, Hideharu, et al., *Development of High-performance Direct Melting Process for Municipal Solid Waste*, Nippon Steel Technical Report No. 92, July 2005.
59. Solena Group, *The Commercial Viability of Plasma Arc Technology*, Solena White Paper, 2006.
60. Solena Group, *The Utilization of Solena Group Integrated Plasma Gasification Combined Cycle System (IPGCC)*, Solena White Paper, 2007
61. Solena Group, *Solena White Paper*, Abril 2008.
62. Solena Group, *Solena White Paper*, June 2008.

63. Solena Group, *Introduction to renewable energy production for Bio-power in Puerto Rico*, University of Turabo, 2006.
64. Steiner Christian, Kameda O., *Ebara's Fluidized Bed Gasification: Atmospheric 2 x 225 t/d for Shredding Residues Recycling and Two-stage Pressurized 30 t/d for Ammonia Synthesis from Waste Plastics*, The 2nd International Symposium on Feedstock Recycling of Plastics, Ebara Corporation, Septiembre 2002.
65. Titus et al., United States. Patent application ser No 6,037,560, applicant. Integrated Environmental Technologies(IET) "*Enhanced Tunable Plasma-Melter Vitrification Systems*", Marzo 2000.
66. Titus et al., United States. Patent application ser No 6,018,471, applicant. Integrated Environmental Technologies (IET) "*Methods and Apparatus for Treating Waste*", Enero 2000.
67. Vatabuk, William M., "Updating the CE plant cost index", *Chemical Engineering*, 2002, 62-70.
68. Vehlow J., Seifert H., A comparison between the existing thermal waste treatment technologies - combustion, gasification, pyrolysis and their various combinations -, Institute for Technical Chemistry Division of Thermal Waste Treatment. sin fecha.
69. Yves Bannel, *Optimización de la valoración energética de biomasa y residuos*, Presente y Futuro de la Energía- COIIAOC, Junio 2008.
70. W R Livingston, *Technical and economic assessment of energy conversion technologies for MSW*, Report No. B/WM/00553/REP, Mitsui Babcock, 2006.
71. Womack R. K., *Using the centrifugal method for the plasma arc vitrification of waste*, JOM Journal, The minerals, metals and materials society, 1999.

ANEXOS

Anexo I
El método PROMETHEE¹.

Los métodos de análisis multicriterio, también llamados «métodos de análisis con criterios múltiples», tienen por objetivo, proporcionar a los tomadores de decisión, herramientas que les permitan resolver un problema donde varios puntos de vista (criterios), la mayoría de las veces no coincidentes, deben tomarse en cuenta. La primera constatación que debe hacerse, cuando se abordan este tipo de problemas, es que no existe forzosamente una decisión que sea la mejor simultáneamente para todos los puntos de vista (criterios). [Tamiz, 1996].

Bajo la notación donde a_i = i-esima alternativa y g_j = evaluación del criterio j, entonces $g_j(a_i)$ representa la evaluación del criterio j sobre la i-esima alternativa. Los datos básicos de un problema multicriterio consisten en la evolución de la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Tabla de evaluación.

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	---	$g_j(\cdot)$	---	$g_k(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	---	$g_j(a_1)$	---	$g_k(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	---	$g_j(a_2)$	---	$g_k(a_2)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_3	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	---	$g_j(a_i)$	---	$g_k(a_i)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	---	$g_j(a_n)$	---	$g_k(a_n)$

Las relaciones de dominio asociadas con un problema multicriterio son:

¹ Fuente: Tomado de J.P. Brans, Bertrand Mareschal, *Chapter 1. PROMETHEE methods*, págs. 1–31. Presses de l'Université Laval, Québec, Canada, 2001.

$$\begin{cases} g_j(a) \geq g_j(b) \\ g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb \\
 g_j(a) = g_j(b) \Leftrightarrow aIb \\
 \begin{cases} g_s(a) > g_s(b) \\ g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \Leftrightarrow aRb$$

Fig. 6.1. Relaciones de dominio

Donde P, I, y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad², respectivamente.

La incomparabilidad se explica de la siguiente manera; si una alternativa es mejor que otra en un criterio s , y ésta última es mejor que la primera en un criterio r , es imposible decidir cual es mejor sin información adicional; ambas alternativas requieren criterios adicionales para optar por una de ellas. Como información adicional se puede tener:

- Pesos que asignan una importancia relativa de los criterios
- Agregar una función que reúna todos los criterios y sea de una sola variable, tal que sea posible obtener un problema mono-criterio, para el cual si existiría una solución óptima.

Muchos métodos multicriterio que han sido propuestos parten de la misma tabla de evaluación, pero las variaciones entre ellos dependen de la información adicional que ellos requieran.

El propósito de todos los métodos multicriterio es reducir el número de incomparabilidades (R). Una manera de lograr esto es construyendo relaciones de rangos, ya sea de superioridad o de inferioridad. En tal caso no todas las incomparabilidades son eliminadas pero la información es fidedigna.

Para construir un adecuado método de resolución de problemas multicriterio algunos requisitos deben ser considerados:

² El término incomparabilidad viene referido a la traducción de la palabra *incomparability*, el cual significa que no se puede tomar una decisión ya que las alternativas involucradas no tienen un margen de comparación.

- La amplitud de las desviaciones entre la evaluación de las alternativas dentro de cada criterio debe ser tomada en cuenta:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

- Como la evaluación $g_j(a)$ de cada criterio está expresada en sus propias unidades, los *efectos de escala* deben reducirse. No es aceptable obtener conclusiones dependiendo de la escala en la cual las evaluaciones están expresadas.
- En el caso de comparaciones entre pares de alternativas, el método multicriterio apropiado debe proveer la siguiente información:

a es preferente a b

a y b son indiferentes

a y b son incomparables

Esto tiene como propósito reducir tanto como sea posible el número de incomparabilidades (R).

- Diferentes métodos multicriterio necesitan diferente información adicional y operan bajo diferentes procesos de cálculo. Es por lo tanto importante desarrollar métodos que sean entendibles para el tomador de decisiones.
- Un procedimiento adecuado no debe incluir parámetros técnicos que no tengan significado para el tomador de decisiones.
- Un método apropiado debe proveer información sobre el grado de contradicción de los criterios.
- A muchos de los métodos multicriterio les son asignados pesos de relativa importancia del criterio. Usualmente el tomador de decisiones titubea fuertemente al asignar los pesos. Un método apropiado debe ofrecer herramientas de sensibilidad para probar fácilmente conjuntos o series de pesos.

El método *PROMETHEE* [Brans, 2002] toma en cuenta todos los requisitos antes mencionados.

6.2. Modelo de la información con *PROMETHEE*.

La información adicional que se requiere para emplear *PROMETHEE* es particularmente clara y entendible, ésta consiste en:

- Información entre los criterios
- Información dentro de cada criterio.

6.2.1 Información entre los criterios.

La Tabla 6.2 debe ser completada; en ella w_j representa los pesos de relativa importancia de los diferentes criterios. Estos pesos deben ser números positivos e independientes de las unidades de medición de los criterios

Tabla 6.2 Pesos de relativa importancia.

$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$...	$g_j(\cdot)$...	$g_k(\cdot)$
w_1	w_2	...	w_j	...	w_k

El peso más elevado, representa el criterio con más importancia. Estos pesos deben estar normalizados, es decir que:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

En el software de *DecisionLab*, el usuario tiene permitido introducir arbitrariamente los números para los pesos sin estar normalizados, haciendo más fácil expresar la importancia relativa de los criterios. En éstos software los números son divididos por su suma, es decir los pesos son normalizados automáticamente.

Evaluar los pesos de los criterios no es sencillo. Esto envuelve prioridades y percepciones del tomador de decisiones. La selección de los pesos representa el espacio de libertad que el tomador de decisiones tiene. En *DecisionLab* se incluyen varias herramientas de sensibilidad para experimentar con diferentes grupos de pesos y con la finalidad de ayudar a fijarlos.

6.2.2 Información dentro de cada criterio.

La estructura de preferencias de *PROMETHEE* está basada en comparaciones de pares de alternativas evaluadas con los criterios y se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el tomador de decisiones asignará una preferencia pequeña para la mejor alternativa, e incluso puede considerar que no hay preferencia alguna si él considera que la desviación es insignificante.

PROMETHEE considera que las preferencias son números reales que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio el tomador de decisiones tiene en mente una función del tipo:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)]$$

Donde

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1$$

En el caso de que el criterio deba ser maximizado, ésta función daría la preferencia de a sobre b , debido a las desviaciones observadas entre sus evaluaciones sobre el criterio $g_j(\cdot)$. Ésta función debe tener la forma que indica la Fig. 6.2.

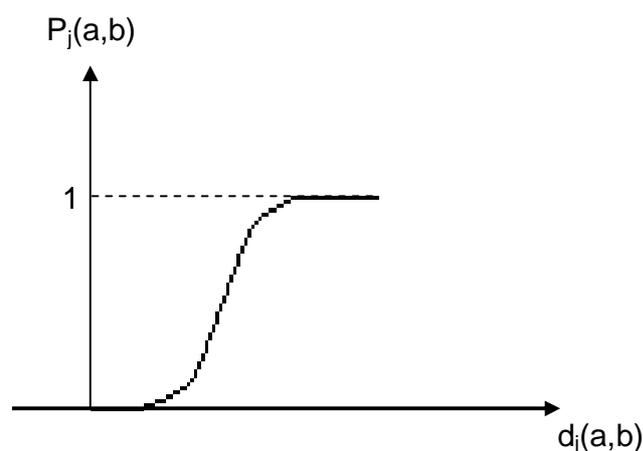


Figura 6.2. Función de preferencia.

Las preferencias son iguales a cero cuando las desviaciones son negativas. Cuando los criterios deben ser minimizados, la función de preferencia debe invertirse:

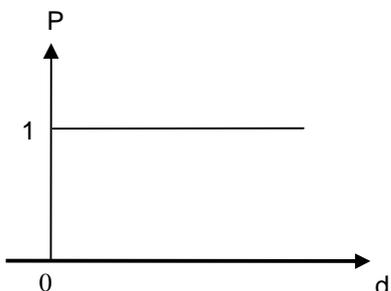
$$P_j(a,b) = F_j[-d_j(a,b)]$$

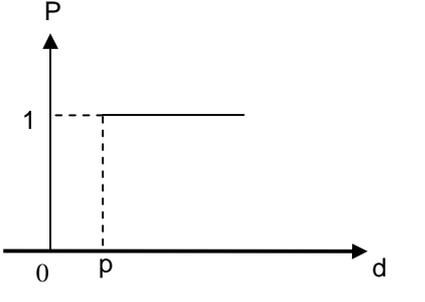
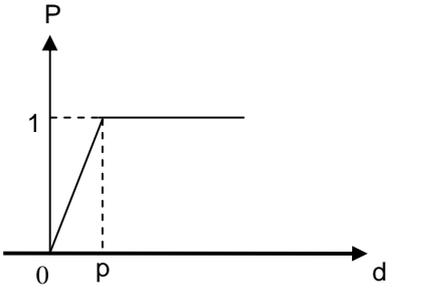
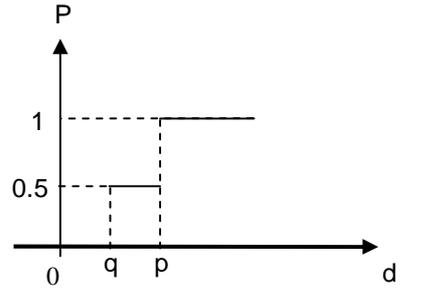
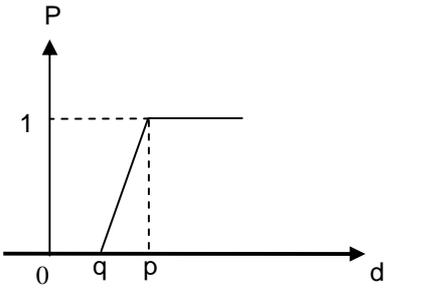
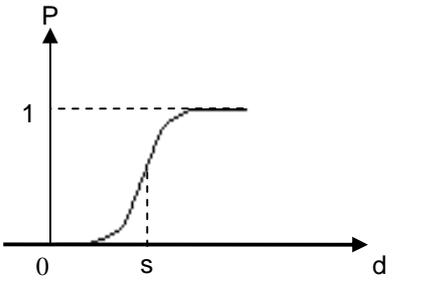
El par $\{g_j(\cdot), P_j(a,b)\}$ es llamado *criterio generalizado* asociado al criterio $g_j(\cdot)$; para cada criterio debe ser definido el criterio generalizado.

En *DecisionLab* se proponen seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la Tabla 6.3. En cada caso necesitan ser definidos 0, 1 ó 2 parámetros cuyo significado sea claro:

- q es el límite de la indiferencia; es decir, es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
- p es el límite estricto de la preferencia; es decir, es la desviación más pequeña que se considerada como suficiente para generar una preferencia amplia.
- s es una valor intermedio entre p y q , éste define el punto de inflexión de la función de preferencia. Se recomienda determinar primero q y p , para después obtener s como un valor intermedio entre estos parámetros.

Tabla 6.3 Funciones de preferencia.

Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
1		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	--

2		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
3		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
4		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
5		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
6		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Tan pronto como la tabla de evaluación sea construida, y los pesos w_j y los criterios generalizados $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$ estén definidos para $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, k$, el procedimiento *PROMETHEE* puede ser aplicado.

6.3 Clasificación I y II de PROMETHEE

Para explicar la clasificación I y II de *PROMETHEE* es necesario definir dos conceptos, índices de preferencia agregados y flujos de categoría superior.

6.3.1 Índices de preferencia agregados.

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \end{cases}$$

$\pi(a, b)$ expresa con que grado a es preferente que b sobre todos los criterios y $\pi(b, a)$ expresa como b es preferente que a . En muchos de los casos hay criterios en los cuales a es mejor que b , y también hay criterios para los cuales b es mejor que a , por consiguiente $\pi(a, b)$ y $\pi(b, a)$ son usualmente positivos.

Cuando $\pi(a, b)$ es prácticamente igual a 0 implica una frágil preferencia global de a sobre b , y cuando $\pi(a, b)$ es prácticamente igual a 1 implica una fuerte preferencia global de a sobre b .

Una vez que $\pi(a, b)$ y $\pi(b, a)$ son calculados para cada par de alternativas de A (A =conjunto de alternativas) puede construirse una gráfica donde se representan los índices de preferencias agregadas de cada criterio.

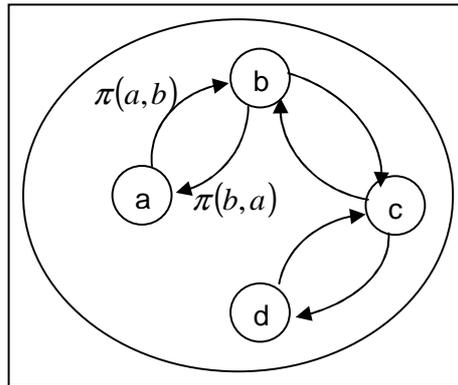


Fig. 6.3 Grafico de índices de preferencias agregadas.

5.3.2 Flujos de categoría superior

Cada alternativa a es comparada contra $(n-1)$ otras alternativas del conjunto de alternativas A , de donde se definen los dos siguientes flujos de categoría:

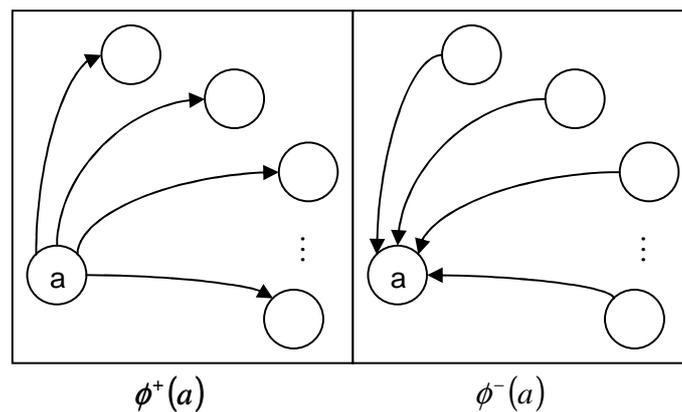
- Flujo de categoría positivo

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

- Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

donde x son todas las alternativas diferentes de a .

Fig. 6.4 Flujos de categorías de *PROMETHEE*

$\phi^+(a)$ expresa como una alternativa a es de categoría superior que todas las demás alternativas. Éste es su poder, su carácter dominante.

$\phi^-(a)$ expresa como una alternativa es de categoría inferior a todas las demás alternativas. Ésta es su debilidad, su carácter de inferioridad.

6.3.3 La clasificación parcial. PROMETHEE I

La clasificación parcial PROMETHEE I (P^I, I^I, R^I) es obtenida de los flujos de categorías superior e inferior. Ambos flujos usualmente no inducen hacia la misma clasificación, PROMETHEE I obtiene sus conclusiones en base a las siguientes relaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{array} \right. \\ \\ aI^I b \quad \text{si} \quad \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) = \phi^-(b) \\ \\ aR^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Fig. 6.5 Relaciones de PROMETHEE I

donde (P^I, I^I, R^I) representan, respectivamente, preferencia, indiferencia e incomparabilidad en la clasificación *PROMETHEE I*.

Cuando $aP^I b$, un alto poder o dominio de a es asociado a una baja debilidad de a con respecto a b . La información de ambos flujos de categoría es consistente y puede por lo tanto ser considerada segura.

Cuando $aI^I b$, ambos flujos, positivo y negativo, son iguales.

Cuando $aR^I b$ la alternativa a es buena en algunos criterios donde b es débil y de manera inversa b es bueno en algunos otros criterios donde a es débil. En tales casos la información que ambos flujos proveen no es consistente. *PROMETHEE I* es prudente y no decide cuál alternativa es mejor en tales casos y entonces el tomador de decisiones debe cargar con esta responsabilidad.

6.3.4 La clasificación completa de PROMETHEE II

PROMETHEE II se encarga de hacer una clasificación completa (P^II, I^II). El flujo neto de dominio puede ser considerado como:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (1)$$

Éste es el balance entre los flujos de dominancia positivo y negativo

$$\begin{cases} aP^II b & \text{si } \phi(a) > \phi(b) \\ aI^II b & \text{si } \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad (2)$$

Cuando PROMETHEE II es considerado, todas las alternativas son comparables, pero la información obtenida puede ser más discutible, debido a que mucha información se pierde por considerar la diferencia de la Ec. 1.