



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**USO EFICIENTE DE ENERGÍA, DESARROLLO SUSTENTABLE
Y CONSERVACIÓN DE RECURSOS NO RENOVABLES. CASO
DE ESTUDIO: PERSPECTIVA DE LAS BOTELLAS DE POLI
(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET).**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA QUÍMICA (PROCESOS) - INGENIERÍA DE PROCESOS

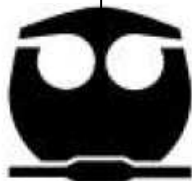
P R E S E N T A:

LOL-CHEN ALEGRÍA MEJÍA

TUTOR:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

2011





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. GARCÍA MEDEIROS DE OLIVEIRA MILTON T.

Secretario: Dr. LÓPEZ SERRANO RAMOS FRANCISCO

Vocal: M.C. GUTIÉRREZ PALACIOS CONSTANTINO

1^{er}. Suplente: Dr. VALDIVIESO MARTÍNEZ RAÚL

2^{do}. Suplente: Dr. ESCOBAR TOLEDO CARLOS ENRIQUE

Lugar en donde se realizó la tesis:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
FACULTAD DE QUÍMICA.**

TUTOR DE TESIS:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante los cuatro semestres de estudios de maestría. Esperando la satisfactoria continuidad de su importante labor en el fomento y desarrollo de la Ciencia y Tecnología en beneficio de la superación de nuestro país entrego esta tesis producto del esfuerzo de dicho organismo así como el grupo de académicos de la Facultad de Química que enriquecieron el presente trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme un nuevo mundo de crecimiento profesional y personal, siempre será un orgullo pertenecer a la comunidad universitaria, por lo que me comprometo a trabajar de manera recta y con ahínco.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por la beca asignada para la redacción final y trámites de la presente tesis a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN102710-2 denominado: “Uso eficiente de energía, desarrollo sustentable y conservación de recursos no renovables: sustitución de bolsas individuales de Polietileno y botellas personales de PET por otros materiales usados como empaques individuales y envases individuales”.

Al mi director de tesis, el Dr. Carlos E. Escobar Toledo por confiar en mi trabajo a lo largo del desarrollo de esta tesis, por sus consejos, enseñanzas y por la amistad otorgada.

DEDICATORIAS

A la mujer que no sólo me ha dado la maravillosa oportunidad vivir, sino que además es un ejemplo de vida. Eres un ser extraordinario mamá, gracias por el enorme esfuerzo desempeñado. Lo único que anhelo es que veas fructificado todo tu empeño, estoy segura que sin tu apoyo mi historia sería otra.

A mi hermana, por sus consejos impregnados de buenos deseos, ambas nos hemos formado en un ambiente de encuentros y desencuentros que nos ha hecho crecer y fortalecer como mujeres; en verdad, gracias, siempre contarás conmigo.

A mi abuelo, por ser el hombre que predicó el valor del trabajo con su vida, siempre incansable y de conducta férrea y persistente. Gracias por los consejos y apoyo brindados desde niña. Nunca voy a dejar de lamentar el hecho de que hayas marchado, pero estoy segura de que te sentirías orgulloso.

A Gerardo, por tener su fe incondicional en mi, inclusive más de la que yo puedo tener. Fuiste el motor para el inicio de esta gran aventura y permaneciste a mi lado en todo momento. Por mucho, sabes que este trabajo también te pertenece.

Al matrimonio Ruiz López, no sólo por abrirme las puertas de su casa, sino además por la confianza, el apoyo y la amistad brindada durante estos años.

Índice General

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
PROBLEMÁTICA Y MARCO DE REFERENCIA	3
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS PARCIALES	7
HIPÓTESIS	8
ABREVIATURAS	9
CAPÍTULO 1 DESARROLLO SUSTENTABLE Y CONSUMO DE ENERGÍA	11
CAPÍTULO 2 DESARROLLO SUSTENTABLE Y RESIDUOS SÓLIDOS.....	23
CAPÍTULO 3 TERMODINÁMICA Y EXERGÍA	37
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y EXERGÍA	62
CAPÍTULO 5 ENVASES	77
CAPÍTULO 6 MERCADO DE LOS ENVASES	100
CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA.....	109
CAPÍTULO 8 RESULTADOS	133
CONCLUSIONES.....	173
APÉNDICE A CÁLCULOS	177
APÉNDICE B REFINERÍA CONFIGURACIÓN 4.....	204
APÉNDICE C DEDUCCIÓN TERMODINÁMICA DE LA EXERGÍA	205
FUENTES CONSULTADAS	208

Índice de Tablas

Tabla 1.1	Tipos de fuentes de energía disponibles.....	15
Tabla 2.1	Marco Legal Mexicano para Manejo de Residuos Sólidos Municipales.	36
Tabla 3.1	Composición del aire atmosférico en el sistema de capa de litósfera	47
Tabla 3.2	Comparación entre los términos Energía y Exergía.	56
Tabla 4.1	Ejemplo de establecimiento de la Unidad Funcional en el ACV.	66
Tabla 4.2	Software para Análisis de Ciclo de Vida.....	71
Tabla 4.3	Bases de Datos sobre Análisis de Ciclo de Vida.....	72
Tabla 4.4	Materias primas de tasas para estudio de ciclo de vida exergético.	74
Tabla 5.1	Codificación de plásticos comerciales.....	79
Tabla 5.2	Poliésteres lineales comercialmente disponibles.....	82
Tabla 5.3	Requerimientos para la producción de 1 Tonelada de vidrio.	91
Tabla 5.4	Porcentajes de pureza del aluminio.	94
Tabla 5.5	Propiedades Físicas del aluminio puro.....	95
Tabla 5.6	Impurezas típicas en alúmina comercial hidratada y calcinada.....	97
Tabla 5.7	Requerimientos para la producción de 1 Tonelada de aluminio.	98
Tabla 5.8	Ahorros como resultado del Reciclaje de una tonelada de aluminio.	98
Tabla 5.9	Consumo de Energía Eléctrica para la producción de aluminio.....	99
Tabla 6.1	Demanda de botellas de PET a nivel mundial.....	102
Tabla 6.2	Consumo de PET en México.....	102
Tabla 6.3	Importación y Exportación de PET en México.	103
Tabla 6.4	Importaciones mexicanas de lámina de aluminio.....	107
Tabla 6.5	Exportaciones mexicanas de aluminio para reciclar (chatarra de aluminio).....	107
Tabla 7.1	Flujo de referencia de los materiales en estudio.....	110
Tabla 7.2	Exergía de los materiales analizados en relación a la unidad funcional.....	112
Tabla 7.3	Producción de petroquímicos en la refinería de configuración 4.....	112
Tabla 7.4	Rendimientos de la planta criogénica de Nuevo PEMEX.....	114
Tabla 7.5	Valores de CIP para la obtención de PET primario.	115
Tabla 7.6	Requerimientos para la fabricación de botellas de PET de 1 litro	115
Tabla 7.7	Requerimientos en la elaboración de PET secundario.	115
Tabla 7.8	Consumo total de energía en refinería y planta criogénica.	116
Tabla 7.9	Exergía química estándar de hidrocarburos y petroquímicos.....	117
Tabla 7.10	Consumo de materias primas para la producción de vidrio primario.....	118
Tabla 7.11	Requerimientos energéticos en la obtención de materias primas de vidrio.....	118
Tabla 7.12	Requerimientos energéticos en la producción de botellas de vidrio.	119
Tabla 7.13	Materias primas para la producción de aluminio primario.....	120
Tabla 7.14	Energéticos en la obtención de materias primas del aluminio.	120
Tabla 7.15	Requerimientos energéticos en la producción de latas de aluminio.....	120
Tabla 7.16	Exergía química de los elementos de contaminantes atmosféricos.....	122
Tabla 7.17	Precios de materiales primarios y secundarios por unidad funcional.....	123
Tabla 7.18	Costos de producción primaria de materiales de envasado	123
Tabla 7.19	Tabla de evaluación.....	125
Tabla 7.20	Funciones de preferencia.....	128
Tabla 8.1	Balance de materia en la producción de PET primario.	133
Tabla 8.2	Requerimientos energéticos en la producción de botellas de PET primario.....	134
Tabla 8.3	Consumo total de energía en la producción de botellas de PET primario.....	135

Tabla 8.4	Resumen de exergía en la producción de botellas de PET primario.	135
Tabla 8.5	Exergías químicas de salida en la obtención de PET primario.	136
Tabla 8.6	Exergía química de contaminantes atmosféricos en la producción de PET	136
Tabla 8.7	Irreversibilidades y eficiencias de la producción de PET primario.....	138
Tabla 8.8	Materia primas para producción de vidrio primario.....	140
Tabla 8.9	Requerimientos energéticos para la obtención de materias primas del vidrio ..	140
Tabla 8.10	Requerimientos energéticos para la elaboración de botellas de vidrio.....	140
Tabla 8.11	Valores exergéticos de componentes del vidrio.	141
Tabla 8.12	Exergía de emisiones atmosféricas en la producción de botellas de vidrio. ..	142
Tabla 8.13	Irreversibilidades en la fabricación de botellas de vidrio.....	143
Tabla 8.14	Materias primas para la producción de latas de aluminio primario.....	144
Tabla 8.15	Energéticos para la obtención de materias primas del aluminio.	145
Tabla 8.16	Requerimientos energéticos para la producción de latas de aluminio.....	145
Tabla 8.17	Exergía de materias primas del aluminio primario.....	147
Tabla 8.18	Exergía de emisiones atmosféricas en la producción de latas de aluminio.....	147
Tabla 8.19	Irreversibilidades y eficiencias en la fabricación de latas de aluminio	149
Tabla 8.20	Exergías para la elaboración de PET secundario.	150
Tabla 8.21	Balance exergético para el elaboración de PET secundario.....	151
Tabla 8.22	Irreversibilidades en la producción de botellas de PET secundario.....	151
Tabla 8.23	Irreversibilidades de la producción de botellas de vidrio secundario.....	153
Tabla 8.24	Irreversibilidades de la producción de latas de aluminio secundario.....	154
Tabla 8.25	Poder Calorífico de los materiales para envasado bajo estudio.	155
Tabla 8.26	Exergía de emisiones atmosféricas en la incineración de botellas de PET.	156
Tabla 8.27	Irreversibilidades en la incineración de botellas de PET.	156
Tabla 8.28	Resumen de irreversibilidades para materiales de envasado.....	157
Tabla 8.29	Disminución de irreversibilidades en el reciclaje de envases	158
Tabla 8.30	Resumen de exergía por emisiones atmosféricas	159
Tabla 8.31	Toneladas de CO _{2eq} emitidas en la producción de envases.....	159
Tabla 8.32	Comparación de los costos de producción primaria y secundaria.....	160
Tabla 8.33	Ganancia económica en la producción primaria de envases.	161
Tabla 8.34	Ganancia económica en la producción secundaria de envases.....	162
Tabla 8.35	Funciones de preferencia aplicadas en el estudio multicriterio.....	165
Tabla 8.36	Estrategia de sustitución de botellas de PET primario.	169
Tabla 8.37	Irreversibilidad, energía y Ton CO _{2eq} sin de PET primario.	169
Tabla 8.38	Irreversibilidad, energía y Ton CO _{2eq} con y sin sustitución	170

Índice de Figuras

Figura 1.1	Concepto de Desarrollo Sustentable.	12
Figura 1.2	Consumo de energía por tipo de combustible en México durante 2009.	17
Figura 1.3	Consumo de Energía por tipo de industria en México.	20
Figura 1.4	Producción de energía por fuente en México.	21
Figura 3.1	Producción de trabajo por un sistema cerrado.	45
Figura 3.2	Cálculo de exergías con enfoque de ciclo de vida de procesos.	50
Figura 3.3	Clasificación de exergía.	51
Figura 4.1	Fases en el Análisis de Ciclo de Vida según ISO 14040.	65
Figura 4.2	Interrelaciones entre las etapas del Análisis de Ciclo de Vida.	65
Figura 4.3	Esquema de análisis de inventario.	68
Figura 4.4	Análisis de Ciclo de Vida Exergético para 3000 tazas de poliestireno.	75
Figura 4.5	Análisis de Ciclo de Vida Exergético de una taza de porcelana.	75
Figura 5.1	Productos obtenidos en el reciclaje químico de PET.	89
Figura 6.1	Participación económica mundial de la industria del envase.	100
Figura 6.2	Países con mayor producción de envases plásticos en 2009.	101
Figura 6.3	Países con mayor producción de envases de vidrio en 2009.	104
Figura 6.4	Países con mayor producción de envases de aluminio en 2009.	106
Figura 6.5	Producción Nacional de latas de aluminio en México.	107
Figura 7.1	Metodología General para el estudio de sustentabilidad.	109
Figura 7.2	Representación física de los materiales de envasado bajo estudio.	111
Figura 7.3	Metodología del Análisis de Ciclo de Vida Exergético. Exergético.	111
Figura 7.4	Límites del sistema para la producción de botellas de PET primario.	113
Figura 7.5	Límites del sistema para la producción de botellas de vidrio primario.	118
Figura 7.6	Límites del sistema para la producción de latas de aluminio primario.	119
Figura 7.7	Análisis de exergía por bloques.	122
Figura 7.8	Relaciones de dominancia.	126
Figura 7.9	Función de preferencia.	127
Figura 7.10	Índices de preferencia de PROMETHEE.	129
Figura 7.11	Gráfico de índices de preferencias agregadas.	130
Figura 7.12	Flujos de categorías de PROMETHEE.	131
Figura 7.13	Relaciones de PROMETHEE I.	131
Figura 7.14	Balance entre flujos de dominancia.	132
Figura 8.1	Balance de exergía en la Producción de PET primario.	137
Figura 8.2	Irreversibilidades de la producción de botellas de PET primario.	139
Figura 8.3	Requerimientos energéticos en la producción de botellas de vidrio primario.	141
Figura 8.4	Balance exergético de la producción de botellas de vidrio primario.	142
Figura 8.5	Irreversibilidades en la producción de botellas de vidrio primario.	143
Figura 8.6	Requerimientos energéticos en la producción de latas de aluminio primario.	146
Figura 8.7	Balance de exergía en la producción de latas de aluminio primario.	148
Figura 8.8	Irreversibilidades en la producción de latas de aluminio primario.	149
Figura 8.9	Balance exergético en la producción de PET secundario.	151
Figura 8.10	Balance exergético de la producción de botellas de vidrio secundario.	152
Figura 8.11	Balance exergético de la producción de latas de aluminio secundario.	154
Figura 8.12	Balance exergético en la incineración de botellas de PET.	156
Figura 8.13	Irreversibilidades en los procesos primario y secundario.	158

Figura 8.14 Toneladas de CO _{2eq} en los procesos primario y secundario.....	160
Figura 8.15 Costos de producción primaria y secundaria envases.....	161
Figura 8.16 Margen de ganancia económica en envases primarios.	162
Figura 8.17 Margen de ganancia económica en envases secundarios.....	163
Figura 8.18 Comparación de ganancia económica.....	163
Figura 8.19 Alimentación de datos a Decision Lab.....	165
Figura 8.20 Ordenamiento PROMETHEE II para envases primarios y secundarios.....	166
Figura 8.21 Plano GAIA para envases primarios y secundarios.	166
Figura 8.22 Ordenamiento y plano GAIA para envases primarios.	167
Figura 8.23 Ordenamiento y plano GAIA para envases secundarios.....	168
Figura 8.24 Comportamiento de irreversibilidades.....	171
Figura 8.25 Comportamiento del consumo de energía.....	171
Figura 8.26 Comportamiento de las emisiones de CO _{2eq}	172

RESUMEN

Esta tesis explora la utilización de la energía en el desarrollo sustentable y las fuentes potenciales para aumentar la eficiencia energética mediante el análisis de exergía y análisis de ciclo de vida de materiales plásticos usados para la manufactura de botellas desechables. Se analizan también otros materiales para la sustitución de las botellas de plástico así como la posibilidad de los procesos de reciclaje.

Se aplican balances de exergía, materia y energía para calcular las pérdidas de exergía y la eficiencia de los procesos de producción seleccionados. También se considera la cantidad real de energía consumida en el ciclo de vida de las botellas así como el gasto de hidrocarburos para su fabricación.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como parte constitutiva del desarrollo sustentable son tratadas en este trabajo desde la perspectiva exergética.

Las pérdidas de exergía, balance de energía y materia así como las emisiones atmosféricas durante el ciclo de vida de los envases son presentados como criterios en el marco de la toma de decisiones a través de la metodología PROMETHEE-GAIA. El aspecto económico es considerado mediante el cálculo de las ganancias de cada material. Asimismo, es analizado el comportamiento del mercado a nivel nacional e internacional de la industria de los envases con el fin de complementar los aspectos involucrados en dicha industria.

El cálculo tanto de los balances como de las emisiones atmosféricas contaminantes corresponde al ciclo de vida de los materiales analizados, es decir, en la totalidad de etapas de producción de envases para la contención de agua así como la disposición final de éstos a través del reciclaje.

El material plástico para envasado analizado es el Poli (Tereftalato de etileno) partiendo de sus materias primas de origen (petróleo y gas natural) .Los posibles materiales sustitutos son el vidrio y el aluminio, comenzando para cada uno desde la extracción de minerales.

De acuerdo a las diversas intersecciones del Desarrollo Sustentable con el uso eficiente de energía, la conservación de recursos naturales no renovables y el manejo adecuado de los residuos sólidos, en esta tesis se expone de cada una de ellas así como el fundamento de las herramientas (exergía, ciclo de vida y análisis multicriterio) utilizados en la metodología de la misma.

Como consecuencia de los resultados obtenidos, en este trabajo, se propone una estrategia de sustitución de botellas de PET primario, por supuesto, con el enfoque de Desarrollo Sustentable.

ABSTRACT

This thesis explores the role of energy utilization in sustainable development and the potential sources to increase energy efficiency by exergy and Life Cycle Analysis (LCA) of plastic materials used for the manufacture of disposable bottles. Other materials are also discussed for the substitution of plastic bottles as well as the possibility of recycling processes.

An exergy balance, together with energy and material flows, are applied to calculate the exergy losses and efficiencies for the selected production processes. This work also considers the real quantity of energy consumed in the LCA of these bottles and the hydrocarbon use and depletion to manufacture them.

Emissions of greenhouse gases (GHGs) as a constituent part of sustainable development are treated in this thesis from the exergetic perspective.

The exergy losses, energy balance, and the material balance, and air emissions during the whole life cycle of packaging are presented as criteria in the framework of multi-criteria decision making through the application of software Decision Lab. The economic aspect is considered by calculating the earnings of each material. Also, the market behavior of domestic and global of packaging industry is analyzed to complement the issues involved in this industry.

The calculation of balances and air pollutant emissions corresponds to the Life Cycle Analysis (LCA), which provides all production stages of containers and the disposal of them through recycling.

The plastic packaging material as bottles, to be treated is Polyethylene Terephthalate, basis of their raw materials (crude oil and natural gas). The potential substitute materials are glass and aluminum, starting from the extraction of minerals.

According to various intersections of Sustainable Development with energy efficiency, conservation of nonrenewable resources and solid waste disposal, this thesis presents each of them and the foundation of tools (exergy, life cycle and multicriteria analysis) used in the methodology.

Following the results, this work proposes a strategy of substitution of primary PET bottles, of course, with a focus on Sustainable Development.

PROBLEMÁTICA Y MARCO DE REFERENCIA

El avance tecnológico en el procesamiento y obtención de los plásticos ha aumentado en número de sus aplicaciones a través de nuevos productos que facilitan en gran medida la manipulación de todo tipo de artículos que van desde alimentos, bebidas o medicamentos. Este éxito de los envases plásticos se debe a las ventajas que ofrecen ya que técnicamente ofrecen un balance excepcional entre el peso, el desempeño, la facilidad de procesamiento, la estética y el costo. En el aspecto económico proporcionan un mayor rendimiento al ser materiales más ligeros, estéticamente permiten una mayor libertad en el diseño respecto a otros materiales como el vidrio o el metal, y desde el punto de vista ambiental la posibilidad de reciclaje o de convertirse en energía por medio de la incineración convierten a los materiales plásticos en una de las alternativas de envase y embalaje más amigables.

Sin embargo, el innegable uso indiscriminado así como la falta de control en la disposición final de los plásticos genera una problemática de desarrollo sustentable debido a la acumulación de residuos sólidos que representan un uso ineficiente de energía y la creciente ocupación de espacios para basureros a cielo abierto, principalmente.

Por otra parte, aunado a este incremento en el uso de envases plásticos la demanda energética se ha modificado. De acuerdo a la Agencia Mundial de Energía (IEA), la demanda de energía seguirá aumentado de manera importante, la oferta de hidrocarburos y carbón para satisfacer esta demanda irá disminuyendo. De acuerdo a IEA, la manera más efectiva de paliar los efectos del crecimiento de la demanda, sobre todo en China y la India, será el uso eficiente de la energía, aún más importante que la sustitución por fuentes alternas renovables.

Es precisamente la idea de que el desarrollo sustentable se considere como una conservación orientada de recursos, lo que crea la necesidad de desarrollar estudios como el que el lector tiene en sus manos.

Lo anterior plantea la necesidad de estudios multidisciplinarios con perspectiva a largo plazo, cuya intersección incluye la utilización de diferentes conceptos, metodologías y herramientas. El marco de referencia de la presente tesis se visualiza en la figura 1 mediante las interrelaciones del desarrollo sustentable:

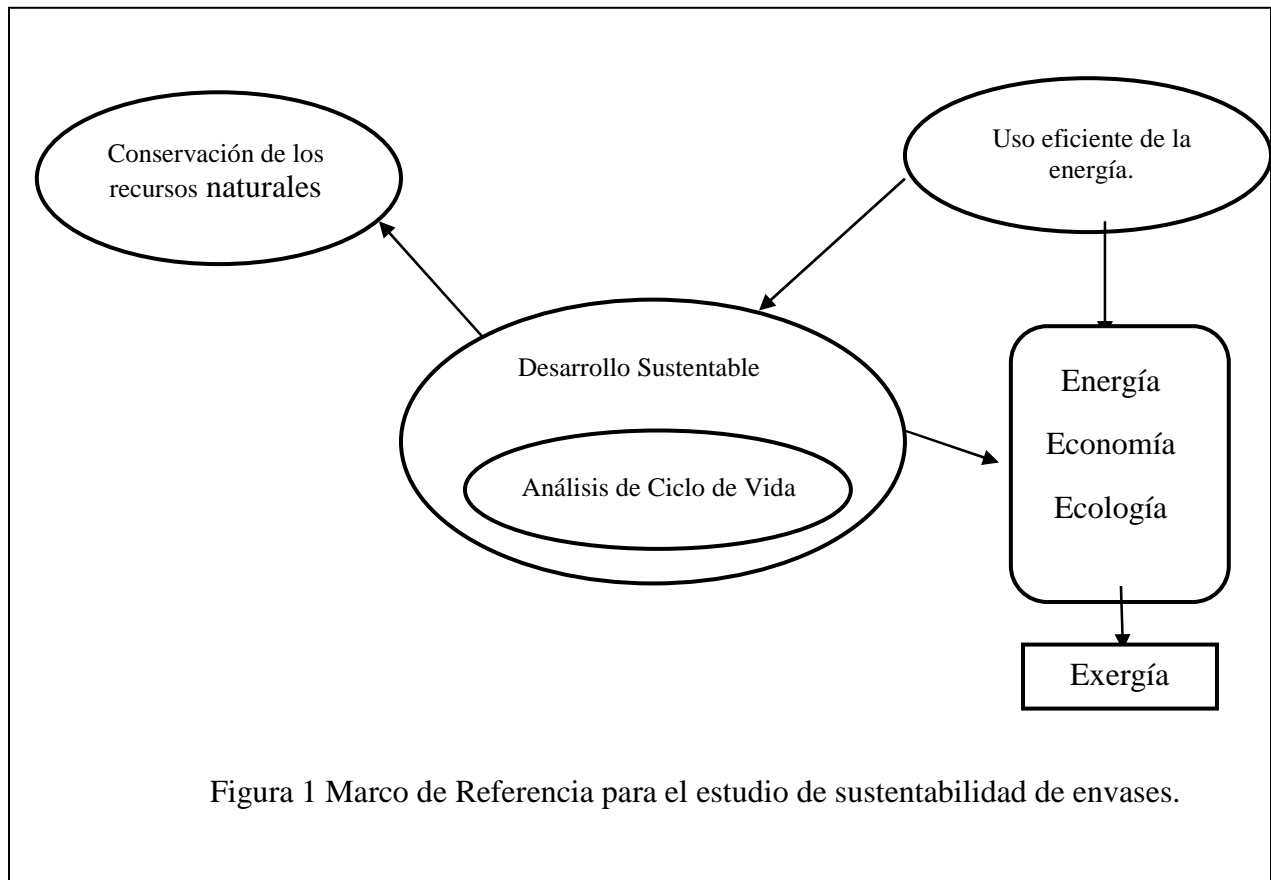


Figura 1 Marco de Referencia para el estudio de sustentabilidad de envases.

En esencia, el desarrollo sustentable no se refiere a una meta tangible ni cuantificable a ser alcanzada en determinado plazo y momento. Se refiere más bien a la posibilidad de mantener un equilibrio entre factores que expliquen un cierto nivel de desarrollo del ser humano, que es transitorio y está en general en un proceso de evolución.

Entre los recursos no renovables que deben alcanzar un nivel de sustentabilidad están los diferentes tipos de energía primaria, principalmente hidrocarburos (petróleo y gas natural) y carbón.

Asimismo, el concepto de Desarrollo Sustentable hace necesario el control en la generación de contaminantes en todo tipo de producción, incluyendo la energética, por lo tanto, la tecnología de producto y de proceso, constituyen el instrumento por el cual deberá buscarse la máxima eficiencia en el uso de la energía y además cumplir con el cuidado del ambiente a través de los diferentes protocolos elaborados con este fin, como la Declaración de Río (disminución de contaminantes como CO₂, NO_x, SO_x y partículas).

Esta tesis se refiere al uso eficiente de la energía en la producción de envases y por ende, en la disminución de gases de efecto invernadero.

Es así que en el marco del desarrollo sustentable, esta tesis hará uso de los conceptos, metodologías y herramientas siguientes:

- El concepto y la metodología de cálculo del Ciclo de Vida. En efecto, la actividad económica está obviamente implicada con el agotamiento de los recursos y con la contaminación del entorno.

Uno de los principales objetivos del Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) es cuantificar los impactos medio ambientales de la manufactura y uso final de productos en su ciclo de vida, que se enfoca a través de la frase “de la cuna a la tumba”. Este enfoque permite una comparación clara entre productos que tienen la misma función. El LCA puede, por lo tanto, contribuir también al diseño de productos, incluyendo la posibilidad de reuso o de reciclamiento, en la etapa de desecho, lo cual ayudaría significativamente al manejo de los residuos sólidos principalmente. El LCA es también una herramienta cuantitativa para calcular diversos parámetros en las etapas de producción y consumo.

- En la presente tesis también se hará uso de métodos y conceptos termodinámicos (energía y exergía) a través de las dos principales leyes de la termodinámica. Lo anterior nos servirá para ilustrar las cadenas de producción de diferentes segmentos de la producción y del consumo de los plásticos. Así, podrán examinarse la meta de incrementar la eficiencia energética y el mejoramiento del potencial exergético. A este respecto, hacer intervenir el LCA ayudará a calcular lo que realmente se utiliza eficientemente de energía, ya que ésta se encuentra presente en todos los análisis de ciclo de vida.

Los recursos energéticos están íntimamente relacionados con el desarrollo sustentable. También existe una liga importante entre la exergía y el desarrollo sustentable; la exergía se usará en esta tesis para señalar el comportamiento de los sistemas energéticos involucrados en la fabricación de los materiales destinados a la elaboración de envases para contención de bebidas.

- También será necesario comparar diversas alternativas para substituir, en el caso que se así se demostrara, el actual PET con otros materiales tales como vidrio y aluminio, o bien, proponer soluciones con base a una mayor duración en el ciclo de vida integral: manufactura, uso y disposición final y/reciclamiento, lo cual conllevaría a la creación de una conciencia para adoptar medidas dentro de la política energética y ambiental en estrecho vínculo con la sociedad civil y las empresas oferentes de este tipo de productos.
- Un indicador de importancia en el campo de desarrollo sustentable está constituido por la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente de CO₂. La creciente preocupación al respecto obedece al notable aumento en dichas emisiones, mismo que tiene repercusión en el calentamiento global. Por lo anterior, en este

trabajo se presentan los resultados de emisiones de CO₂ correspondientes a los materiales bajo estudio, lo cual constituirá una herramienta más de análisis de esta tesis.

- Por último, como elemento indispensable, será necesario abordar índices económicos como costos de producción y precios ya que la industria del envasado es una fuente económica y de empleos muy importante no sólo en México sino a nivel internacional.

Es necesario hacer notar que en el caso particular de las botellas individuales de Poli (Tereftalato de etileno), su ciclo de vida implica a priori ineficiencia energética debido a que su uso se lleva a cabo durante un corto periodo de apenas unas horas o incluso minutos para después desecharse con un nivel de reciclamiento muy bajo y específicamente para las botellas en las que se envasa agua, con un costo elevado de ésta.

OBJETIVO GENERAL

Buscar y analizar las alternativas para lograr un uso eficiente de energía en el ciclo de vida de botellas de Poli (Tereftalato de etileno) que contengan como principal virtud la demostración de que su manufactura, su uso y disposición final se realicen con medidas apropiadas para obtener un desarrollo sustentable.

OBJETIVOS PARCIALES

- 1) Analizar en términos energéticos el proceso de obtención del Poli (Tereftalato de etileno) bajo el enfoque de Ingeniería Química de Procesos llevando a cabo balances de materia y energía durante el ciclo de vida de la producción de las botellas en cada una de las etapas.

- 2) Aplicar el análisis exergético en la medición de eficiencia energética durante cada una de las etapas del ciclo de vida de las tecnologías de proceso y de producto, para la manufactura de las botellas de PET.

- 3) Calcular los efectos netos de la contaminación respecto a la energía utilizada en el ciclo de vida y los recursos naturales utilizados para la producción de las botellas de Poli (Tereftalato de etileno) y sus posibles sustitutos.

- 4) Comparar las botellas de Poli (Tereftalato de etileno) con otros materiales, principalmente vidrio y aluminio, para su posible substitución aplicando la misma metodología.

- 5) Estudiar económicamente los procesos primario y secundario de envases como uno de los criterios en la toma de decisiones.

HIPÓTESIS

- 1) Es factible medir la exergía en el ciclo de vida de las botellas de Poli (Tereftalato de etileno) y con ello realizar el análisis de sustentabilidad sobre energía perdida, irreversibilidades, y la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

- 2) Es factible medir, mediante balances de materia y energía en todos y cada uno de los procesos de la cadena de producción de PET, la cantidad de recursos no renovables utilizados en las etapas de manufactura que representan el ciclo de vida de las botellas de PET.

- 3) Existen alternativas tecnológicas para el uso eficiente y sustentable de energía en el ciclo de vida de las botellas de Poli (Tereftalato de etileno) como el reciclaje de éstas.

- 4) Las consecuencias positivas y negativas así como la probabilidad de éxito derivadas de este estudio podrán cuantificarse, clasificarse, jerarquizarse y comprobarse a través de sus repercusiones en la eficiencia energética, económica y ambiental a largo plazo.

- 5) Existen alternativas de sustitución del PET por materiales como vidrio o aluminio, a los cuales se les deberá aplicar la misma metodología y con ello estar en la posición de llevar a cabo las comparaciones correspondientes.

ABREVIATURAS

- ACV:** Análisis de Ciclo de Vida.
- bpce:** Barriles de Petróleo Crudo Equivalente.
- CIP:** Coeficiente Insumo-Producto.
- EJ:** Exa-Joules
- EPA:** Environmental Protection Agency
- FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Gcal:** Giga Calorías.
- GEI:** Gases de Efecto Invernadero.
- GNH:** Gas Natural Húmedo.
- H:** Entalpía.
- IEA:** International Energy Agency.
- INE:** Instituto Nacional de Ecología.
- LGEEPA:** Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de México.
- Mbl:** miles de barriles.
- MMBD:** Millones de Barriles Diarios.
- MMPCD:** Millones de Pies Cúbicos Diarios.
- MMMBPCE:** Miles de Millones de Barriles de Petróleo Crudo Equivalente.
- MPa:** Mega Pascales.
- ONU:** Organización de las Naciones Unidas.
- PCN:** Poder Calorífico Neto.
- PEMEX:** Petróleos Mexicanos.
- PET:** Poli (Tereftalato de etileno).
- PJ:** PetaJoules
- Q:** calor.
- ROI:** Return On Investment.
- RSU:** Residuos Sólidos Urbanos.

S: Entropía.

SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social.

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SENER: Secretaría de Energía.

SETAC: Sociedad de Ecotoxicología y Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)

T: Temperatura.

TEP: Toneladas Equivalentes de Petróleo.

Ton. CO_{2eq}: Toneladas de CO₂ equivalente.

U: Energía Interna.

u.f.: Unidad Funcional.

W: Trabajo.

CAPÍTULO 1

DESARROLLO SUSTENTABLE Y CONSUMO DE ENERGÍA

1.1 Definición de Desarrollo Sustentable

“Sustentabilidad es un término engañosamente sencillo para un concepto extremadamente complejo...incluye economía, ecología y bienestar personal y social en un solo paquete utilizando dinámica de sistemas y remite todo el conjunto hacia décadas posteriores. No es sorprendente que no le sea fácil llegar a su destino.”

Alan Atkisson.

Durante las primeras décadas de la creación de la Organización de las Naciones Unidas la problemática ambiental no formaba parte de las prioridades de la comunidad mundial. Fue a causa de la contaminación marina por derrames de petróleo y los crecientes indicios del deterioro ambiental que las Naciones Unidas se convirtieron en uno de los principales impulsores del Desarrollo Sostenible y en diciembre de 1992 se crea la Comisión para el Desarrollo Sostenible. En este mismo año, durante la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), los líderes de los Estados miembros de la ONU aprobaron el Programa 21, en el cual los gobiernos trazaron pautas de acción detalladas a favor de las actividades de protección y renovación de los recursos naturales [1].

El desarrollo sostenible, perdurable o sustentable fue planteado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland (1987), como resultado de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en Asamblea de las Naciones Unidas en 1983. La definición correspondiente al Desarrollo Sustentable fue posteriormente proporcionada en el principio tercero de la Declaración de Río (1992) de la siguiente manera: “Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”. El objetivo del Desarrollo Sostenible es definir proyectos viables y reconciliar los aspectos económico, social, y ambiental de las actividades humanas.

Asimismo se puede entender este concepto como: "Desarrollo agropecuario y rural sustentable mediante la administración y conservación de la base de recursos naturales y la orientación de los cambios tecnológicos e institucionales de tal forma que aseguren el logro y la satisfacción permanentes de las necesidades humanas para el presente y las futuras generaciones. Dicho desarrollo sustentable (en los sectores agropecuario, forestal y pesquero) conserva la tierra, el agua, los recursos genéticos de los reinos animal y vegetal, no degrada el medio ambiente, es tecnológicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable" [2].

En nuestro país la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) define al Desarrollo Sustentable como: *proceso evaluado mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de*

recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras [3].

Estas definiciones expuestas convergen en el hecho de que el Desarrollo Sustentable se trata de un concepto integral que además de considerar los tres pilares principales de Protección Ambiental, Desarrollo Social y Crecimiento Económico, debe asumir la posición de que la transformación de la energía debe estar basada en el uso eficiente de la misma mediante Innovación y Tecnología, por lo que este concepto puede quedar representado mediante la figura 1.1:

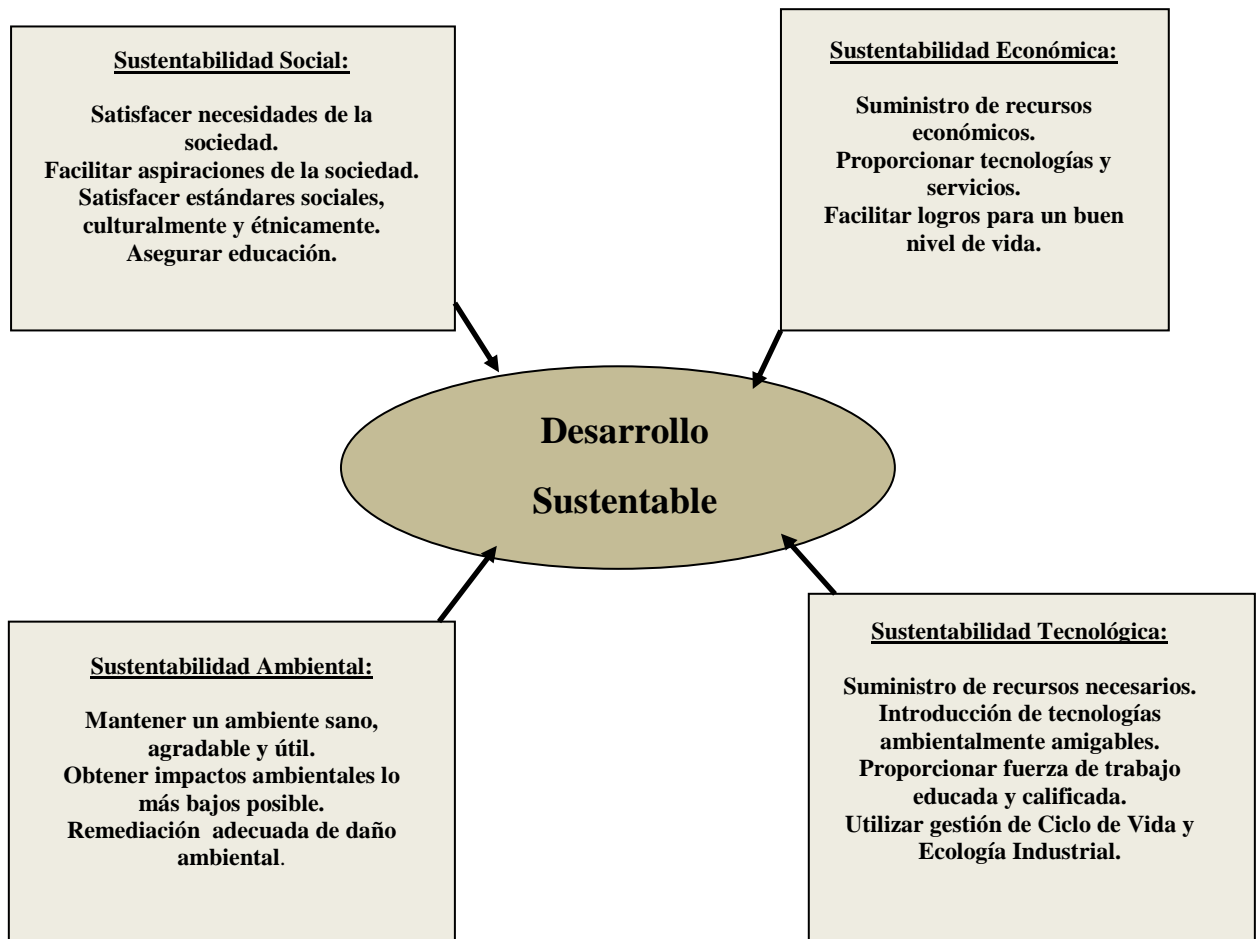


Figura 1.1 Concepto de Desarrollo Sustentable.

1.1.1 Protocolo de Kioto

La preocupación de la comunidad mundial por el tema de Desarrollo Sustentable ha llevado a la elaboración de acuerdos encaminados al cumplimiento de compromisos en cada uno de los rubros comprendidos por este concepto. En la Cumbre Mundial para la Tierra de 1992, celebrada en Río de Janeiro, se creó la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), como respuesta a la creciente evidencia de que la actividad humana tiene efectos sobre el clima y contribuye al calentamiento global.

Posteriormente surge el Protocolo de Kioto como un documento asociado a la Convención de Cambio Climático de las Naciones Unidas teniendo como característica principal el establecimiento de objetivos por parte de algunos países industrializados para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero; el valor promedio de este compromiso es una disminución de 5% de emisiones de 1990 hasta el 2012. La diferencia entre dicha Convención y el Protocolo es que mientras la primera convoca a los países a tomar medidas para la estabilización de sus emisiones de gases contaminantes, el protocolo los compromete a realizarlo.

El Protocolo de Kioto se adoptó en Japón el 11 de diciembre de 1997 entrando en vigor el 16 de febrero del 2005. Los detalles para su implementación se fueron fijados en el COP7 en Marrakech en 2001, por lo que son llamados “Acuerdos de Marrakesh”. Bajo este tratado los países deben llegar a sus objetivos principalmente por medidas nacionales. Sin embargo, el Protocolo de Kioto les ofrece medios adicionales para alcanzarlos mediante los siguientes mecanismos [4]:

- Intercambio de Emisiones, también conocidos como mercado de carbón.
- Mecanismos de Desarrollo Limpio.
- Implementación Conjunta

Estos mecanismos ayudan a simular inversiones ecológicas y ayudan a las partes a cumplir sus objetivos de una manera costo/efectiva. Bajo el Protocolo, las emisiones actuales de los países deben ser monitoreadas en precisos historiales que deben ser almacenados para su análisis para lo cual el Secretario del Cambio Climático de las Naciones Unidas tiene un historial de las transacciones internacionales para verificar que estas sean consistentes con las reglas del Protocolo.

El Protocolo de Kioto constituye un importante paso hacia la reducción de gases de efecto invernadero con proyecciones de estabilización a largo plazo además de proporcionar la estructura esencial para futuros acuerdos internacionales.

1.1.2 Mercado de Carbono

Con el nombre de “bonos de carbono” se hace referencia a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones. Así, se puede decir que existen “varios tipos” de bonos de carbono, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados [5]:

- *Certificados de Reducción de Emisiones*: los países que inviertan en proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, pueden obtener Certificados de Reducción de Emisiones por un monto equivalente a la cantidad de bióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto conforme a los requisitos establecidos por el Consejo Ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio de Naciones Unidas.
- *Montos Asignados Anualmente*: 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 Kioto. 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*: 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*: corresponde a créditos obtenidos por un país durante proyectos de captura de carbono. Estas unidades o créditos solamente pueden ser obtenidas por países del Protocolo de Kioto 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.

Se estima que México posee un potencial de reducción y captura de emisiones de aproximadamente 81 millones de toneladas de carbono para el periodo 2008-2012 equivalentes a 500 millones de dólares; sin embargo, este potencial se ve afectado por limitaciones e incertidumbres relacionadas con el futuro del Protocolo de Kioto ya que en la sesión 15 de la COP celebrada en 2009 en Copenhague no se alcanzó ningún acuerdo entre las Naciones, dichas negociaciones se retomaron en 2010 mediante la COP 16 con sede en Cancún, México. Entre las medidas acordadas se pueden mencionar [6]:

- Aumento máximo de temperatura en el planeta es de 2°C.
- Creación de un fondo económico administrado por el Banco Mundial (Fondo Verde) para que los países subdesarrollados combatan el cambio climático.
- Reducción voluntaria de emisiones de CO₂.

Sin embargo, entre los más 190 países reunidos, continúan existiendo inconformidades con el conjunto de medidas contra el cambio climático.

Como se puede apreciar, se ha estimulado el interés en las acciones para conseguir un Desarrollo Sustentable a través de la estabilización de emisiones de gases contaminantes por medio de una interpretación en términos monetarios como motor para el cumplimiento de los objetivos planteados. Aunque este hecho pueda constituir un tema de controversia, lo que queda claro es que, independientemente del método utilizado, ya no se puede continuar omitiendo y/o restando prioridad a la puesta en marcha de mecanismos como los planteados en Kioto.

1.2 Consumo de Energía en el Mundo

La energía juega un papel clave en el análisis de procesos, sistemas y dispositivos en los cuales ocurren transferencias y transformaciones de la misma. La revolución industrial se vio impulsada por el descubrimiento de cómo explotar la energía a gran escala y cómo convertir el calor en trabajo; la naturaleza permite la conversión de completa de trabajo en calor, pero éste no puede ser completamente transformado en trabajo.

Es imposible concebir a la sociedad moderna sin mencionar los procesos de conversión de energía y el rendimiento de los mismos. El valor de los recursos mundiales de petróleo y gas natural fue cada vez más apreciado a partir de sucesos como el embargo de petróleo por los árabes a principios de 1974 a Estados Unidos y Europa Occidental a través de la decisión de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) como represalia por su apoyo a Israel en el guerra del Yom Kippur. Una de las consecuencias fue que se cuadruplicó el precio del petróleo y se produjeron cortes de suministro. De este modo se incrementó la preocupación por la investigación en tecnología energética que permita utilizar los recursos de modo seguro, eficiente y económico.

Esta dependencia crítica sobre la energía como medida del crecimiento económico parece requerir incrementos considerables en el uso de la misma. A lo anterior se agrega la necesidad de superar la disminución de fertilidad de suelos, agua para cultivo, disponibilidad de reservas minerales de calidad y recursos fósiles. Como es sabido, las fuentes de energía primarias disponibles para nuestro uso frecuentemente se clasifican como renovables y no renovables. La primera comprende aquellos bienes que se renuevan continuamente a causa de la presencia de fuerzas físicas como marea, viento, caída de agua, calor geotérmico; la segunda se refiere principalmente a combustibles fósiles depositados en la Tierra hace cientos de miles de años, o a minerales radiactivos que estaban presentes cuando el planeta se formó. Cuando éstos últimos materiales se explotan, el capital energético se reduce; en la actualidad los combustibles fósiles se están reponiendo en la naturaleza tan despacio en la escala del ser humano que dicha reposición resulta insignificante. Esta clasificación de las fuentes de energía se muestra en la tabla 1.1 [7]:

Renovables	No Renovables
Energía Hidroeléctrica	Petróleo Crudo
Mareas	Gas Natural
Calor Geotérmico	Carbón
Biomasa	Fisión Nuclear
Viento	Petróleo Sintético (a partir de arenas y esquistos petrolíferos)
Aportación Solar	
Gradientes Térmicos en océanos	

Se estima que durante el siglo XX, el consumo anual de energía primaria suministrada de forma comercial en el mundo aumentó más de diez veces teniendo dos causas principales: crecimiento de aproximadamente 2.5 veces de la población mundial y el incremento de la mecanización en el mundo industrializado. Fue hasta 1875, cuando la madera después de posicionarse como el combustible predominante se reemplazó por el carbón, el cual alcanzó su máxima provisión mundial de energía en 1915 cuando su uso comenzó a declinar a medida que el petróleo y el gas natural adquirieron mayor importancia.

Respecto al consumo mundial actual de energía proveniente de recursos fósiles, en 2007 éste fue de 409 EJ (ExaJoules) de los cuales 165.5EJ corresponden a petróleo, 133.0EJ a consumo de carbón y 110.5EJ de gas natural [8]. En consideración de las limitaciones energéticas, los esfuerzos en energías renovables se ven reflejados de manera cuantitativa en 11.1 EJ (ExaJoules) de energía hidroeléctrica, y 4.6 EJ (ExaJoules) en energía obtenida a partir de biomasa. El crecimiento anual de energía renovable fue de 2.5% en el lapso 1980-2000 después de lo cual se experimentó un aumento al 3% para el 2008. Si se asume esta tasa de crecimiento hasta el año 2030, éste tipo de fuentes generarían alrededor de 33 EJ (ExaJoules), lo cual se aproximaría al doble de la energía renovable correspondiente al año 2006 [9]. Sin embargo, se debe mantener cierta precaución en los estimados del potencial de estas energías por varias razones como la dependencia de tecnología aún no probada comercialmente; asimismo, las funciones de los ecosistemas se verían comprometidas ya que en el caso de la biomasa se afecta directamente la provisión de alimentos y recursos forestales, por lo tanto el uso futuro de fuentes renovables de energía es todavía incierto [10].

Los estudios encaminados al establecimiento de alternativas de solución a los problemas de sustentabilidad se amplían con el análisis de la energía nuclear, ésta ha tenido en los últimos años una contribución relevante en la producción de energía al generar 9.4 EJ alrededor del mundo en el 2007. Los escenarios pesimistas en este campo para el año 2030 corresponden a una disminución en su producción del orden de 14.2% a 12.4% y la estimación optimista para el mismo año es de una participación del 14.4% de la energía producida a nivel mundial [11]. Aunque la principal oposición hacia la energía nuclear parte del punto de vista medioambiental, a excepción de la extracción de uranio, sus respectivas operaciones de generación tienen pocos efectos en los ecosistemas y en el flujo de recursos, además de que las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera son en cantidades insignificantes durante la operación de los reactores, en este sentido un punto a considerar podría ser el combustible consumido especialmente en la construcción del reactor y en el enriquecimiento del uranio. Sin duda alguna, los argumentos de oposición de mayor peso son en materia de salud y riesgos a la integridad de los seres humanos, lo cual adquirió mayor fuerza después del acontecimiento accidental de Chernobyl en abril de 1986 [9]. La oposición al establecimiento de plantas nucleares ha incrementado en el mundo a causa de las fugas radiactivas acontecidas en Japón tras el devastador temblor del 11 de marzo de 2011. Uno de los países con mayor presencia opositora al respecto es India, cuyos habitantes están en contra de la construcción de la planta nuclear en Jaitapur a pesar de que este país sufre escasez energética. Dicha planta abastecería de energía a 10 millones de hogares aproximadamente.

De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, IEA (por sus siglas en inglés), por primera vez desde 1981, la utilización mundial de energía disminuyó en 2009 como resultado de la crisis financiera y económica lo cual significó un decremento de la emisión de gases de efecto invernadero; sin embargo, se estima que la demanda de recursos energéticos retomará su tendencia al alza mediante políticas adecuadas y una pronta recuperación económica. Este organismo prevé que la demanda mundial de energía primaria aumente en 1.5% anual entre 2007 y 2030, con lo cual pasaría de 12,000 millones TEP (Toneladas Equivalentes de Petróleo) a 16,800 millones de TEP, lo cual representa un incremento total de 40% durante este periodo [11].

A través de los reportes sobre consumo de energía por combustible durante el año 2009 en México mostrados en la figura 1.2, se puede apreciar que el petróleo y gas natural representan los recursos más utilizados para la provisión de energía que, a diferencia del caso mundial, el carbón no representa un importante recurso energético disponible [8].

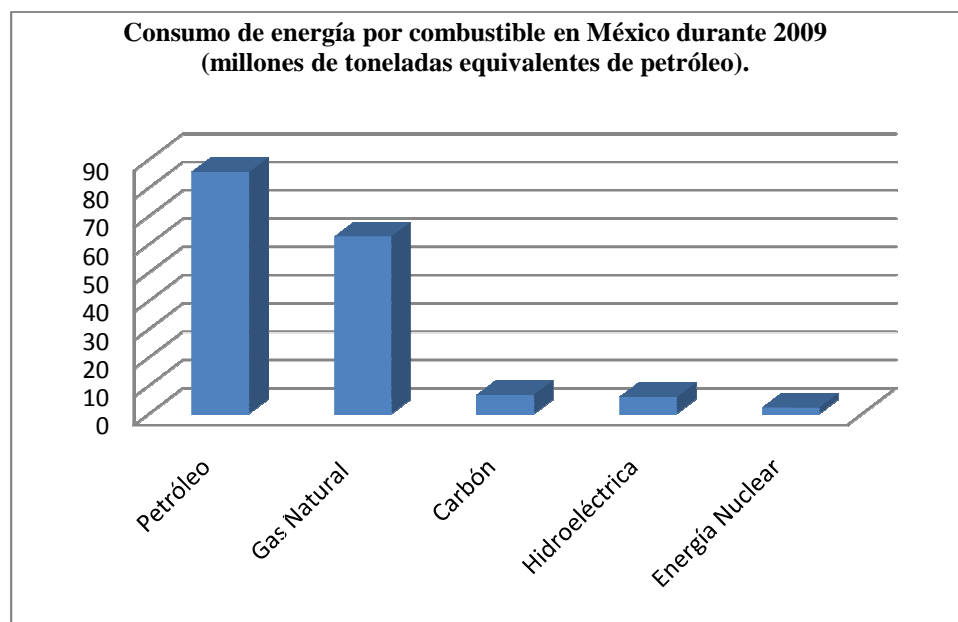


Figura 1.2 Consumo de energía por tipo de combustible en México durante 2009.
Fuente: British Petroleum (BP, 2009).

Estos resultados de carácter internacional conservan cierta semejanza con las publicaciones de un año anterior (2008) de la Secretaría de Energía en México (SENER) [12] al reportar que 89% de la producción total de energía primaria en 2008 correspondió a fuentes fósiles, observándose en los últimos años una sustitución gradual de petróleo por el gas natural. Las fuentes limpias (hidroeléctricas, nucleares y renovables) continúan con una participación reducida de sólo 5% de la producción total de energía primaria en el mismo año.

Así, queda evidenciado el escaso uso de otros recursos renovables en la generación de energía; pero sobretodo, la gran necesidad de hacer un uso eficiente de ésta en el campo de los hidrocarburos dado la amplia aplicación de éstos en términos energéticos.

1.3 Petróleo y Recursos Minerales

El petróleo es una mezcla oleosa formada predominantemente de hidrocarburos cuya composición y propiedades varían en cada uno de los depósitos. Sus componentes se pueden clasificar como: hidrocarburos, compuestos oxigenados, compuestos de azufre compuestos nitrogenados, componentes resinosos y asfálticos, y compuestos metálicos.

Este recurso ha representado un factor primordial en la política mundial por lo menos desde la conferencia de San Remo o “Conferencia del Petróleo” debido a su alta importancia como recurso energético. La producción comercial de aceite de esquisto, principalmente para obtener queroseno, precedió a la industria petrolera en aproximadamente 15 años; en tanto se dispuso de cantidades industriales una vez aplicada la primer tecnología de perforación de pozos [13].

El creciente consumo de productos derivados del petróleo ha dado origen a intensivos programas mundiales de exploración de depósitos de petróleo y gas natural. Muchos de los principales países usuarios de estas dos materias primas no cuentan con un suministro doméstico significativo; este desequilibrio entre suministro y demanda de combustibles líquidos y gaseosos constituye la base de un grave problema de abastecimiento de energía.

El mundo, por lo tanto, encara una contribución menguante del petróleo hacia las necesidades de energía primaria del planeta; y el gas natural podría alcanzar una posición semejante a mediados del presente siglo cuando se pronostica que las cantidades de petróleo y gas recuperadas decaigan conforme al agotamiento de los depósitos.

En este contexto, si se prevé que el petróleo y el gas van a menguar en importancia como fuentes de energía, entonces dadas las contribuciones (aún escasas) en producción energética de fuentes renovables, el recurso fósil más grande disponible es el carbón. Sin embargo, un factor de importancia en el uso futuro de fuentes de energía es el impacto ambiental y social de cada una de ellas como se analizará más adelante.

En el caso de nuestro país la producción de crudo ha decrecido significativamente, ya que al alcanzar un máximo en 2004 de 3.4 millones de barriles diarios (MMBD), la producción bajó a una tasa de 5.1 % anual entre 2004-2009. En el 2009, fue 23% menor que la producción máxima observada en 2004. Entretanto, la producción de gas continúa a tasas de crecimiento significativas pasando de 4,570 millones de pies cúbicos diarios (MMPCD) en 2004 a 6, 650 MMPCD en 2009 [12].

En cuanto al volumen total de reservas ha disminuido alrededor de 23% al pasar de 56.1 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente (MMMBPCE) en 2000 a 43.5 MMMBPCE en 2008 [12].

Además, se debe considerar que las reservas totales de estos recursos no renovables (reservas, descubrimientos, y producción de hidrocarburos) en millones de barriles de petróleo crudo equivalente en el país presenta en promedio una tasa de disminución de 2.1%. Un reflejo de la disminución de producción energética en nuestro país es la necesidad de las importaciones de energía en México que fueron de 1,804.05 PJ entre carbón, coque de carbón, Gas LP, Gasolinas y naftas, Querosenos, Diesel, Combustóleo, Gas seco, y Electricidad [14].

1.3.1 Industria Petroquímica

La Industria Petroquímica es aquella dedicada al estudio y obtención de productos de conversión del petróleo o sustancias químicas puras obtenidas industrialmente del petróleo o gas natural, llamadas también productos petroquímicos, la cual ha alcanzado una importante posición en la industria química orgánica [15].

La Industria Petroquímica consiste en una extensa red de cadenas entrelazadas destinadas a la elaboración de compuestos demandados por la economía. El comienzo de dichas cadenas son los productos obtenidos de la refinación del petróleo y/o procesamiento del gas natural asociado y no asociado. Es posible producir un mismo compuesto mediante diferentes cadenas, procesos e incluso materias primas. Para la mayoría de los productos, la ruta de producción parte del metano, etano y etileno, propano y propileno, butano, pentanos y los aromáticos.

Debido a que el desarrollo económico de un país implica, sin lugar a duda, un aumento en la demanda de energéticos, se hace necesaria la implementación de medidas para disminuir la intensidad de éstos en diversas áreas a través de un uso eficiente en el consumo de energía al ser innegable la continuidad en la dependencia de fuentes no renovables para la generación de energéticos. En este marco, la industria petroquímica es parte fundamental del funcionamiento de todo país industrial dado el considerable impacto económico directo, además de proporcionar insumos indispensables para las industrias manufactureras, que los transforman en productos con un valor agregado mucho mayor. Sin embargo, la situación actual de esta industria en México es preocupante dado que el 80% de sus plantas se encuentran paradas, problema que se refleja en las importaciones de productos manufacturados derivados como fibras sintéticas, plásticos, hules y elastómeros, pinturas, barnices, detergentes, fertilizantes, etc. [16].

La expansión de la industria petroquímica en México se frenó en 1982 debido a que las plantas petroquímicas requieren como materia prima para su operación gas natural “húmedo” con gran cantidad de “licuables” como etano, propano, butano y gasolinas. Y, debido a que la actual Política Energética se basa en la utilización de gas natural “seco” cuya principal aplicación es la generación de energía eléctrica, las nuevas instalaciones y plantas petroquímicas fueron canceladas [16].

1.3.2 Recursos Minerales

Los minerales son cuerpos de materia sólida del suelo que pueden aparecer de diversas formas ya sea de forma aislada o como componentes fundamentales de las rocas.

A pesar de que el agotamiento de los recursos naturales constituye una de las cuestiones clave a enfrentar en este siglo, aún no se ha prestado mucha atención a los minerales debido a que para muchos se considera que la corteza terrestre contiene una gran riqueza en minerales y que sólo es cuestión de tecnología y suficiente energía para la extracción de los mismos. A pesar de las estrategias de reciclaje y sustitución de materiales, se deben considerar los siguientes puntos de análisis para los minerales:

1.- La corteza terrestre ofrece límites de perforación y explotación: Kingsley Dunham [17] señala que sólo la parte superior de la corteza terrestre en un rango de 3-5 Km. es accesible para el hombre con fines de explotación, pero muy pocas minas penetran a más de 3.5 Km., lo cual significa que sólo una décima parte de la corteza continental es de interés potencial.

2.- El incremento en la tasa de extracción: Meadows [18] afirma que desde principios de los años setenta se ha observado una creciente escasez de materiales que tarde o temprano colapsará economías. El rápido desarrollo y cambio de estándares de estilos de vida en países como China e India está aumentando aún más la tasa de extracción de minerales. Además, a lo largo del siglo XX las mejores minas ya han sido explotadas, lo cual implica que los depósitos restantes requieren de mayor cantidad de energía, así como una mayor degradación de la tierra y uso del agua que las minas anteriores, y esta tendencia se vuelve exponencial.

3.- Aún son insuficientes las tecnologías para reciclaje y sustitución de materiales: debido a esta insuficiencia, la extracción de minerales continúa incrementando rápidamente, por lo que muchos metales apenas podrán estar disponibles para futuras generaciones.

En México el consumo de energía en la industria minera representa un 5.7 % de un total de 1,341.79 PJ del sector industrial según el balance de energía 2008 de SENER de la figura 1.3 [19].

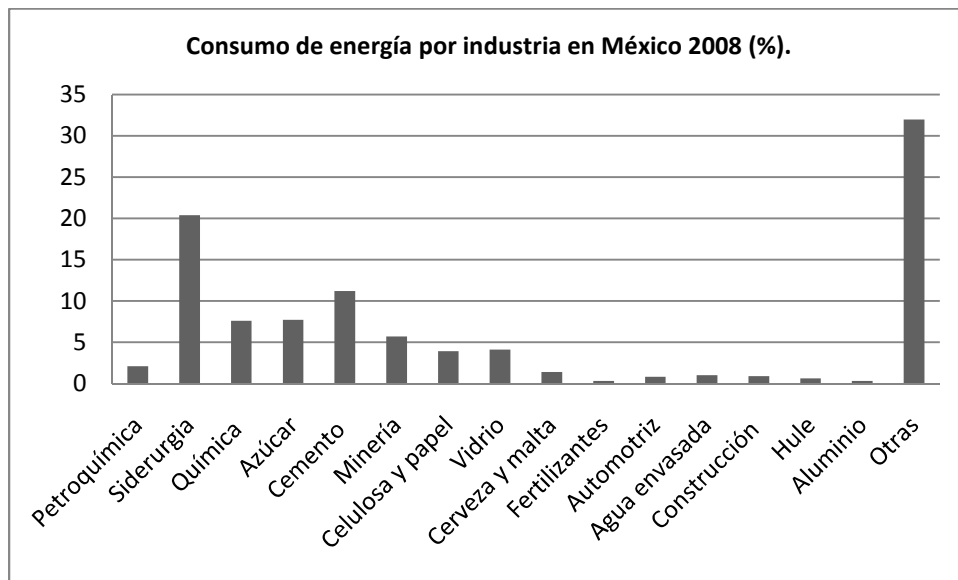


Figura 1.3 Consumo de Energía por tipo de industria en México.
Fuente: Secretaría de Energía (SENER, 2008)

La producción de energía primaria a partir de recursos no renovables con la finalidad de cubrir la demanda energética en nuestro país continúa con una participación mayoritaria de

los hidrocarburos, tal como lo muestra la gráfica 1.4 obtenida a partir de datos de la Secretaría de Energía en 2008 [19]:

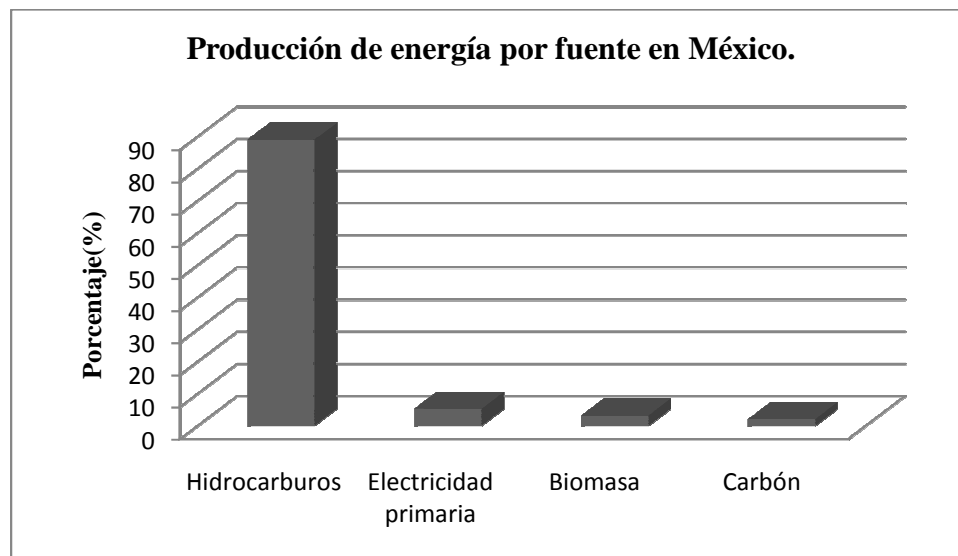


Figura 1.4 Producción de energía por fuente en México.

Fuente: Secretaría de Energía (SENER, 2008)

Como se aprecia en la figura 1.4, en México los hidrocarburos se mantuvieron como la principal fuente al aportar 89.1% en la producción de energía primaria. Sin embargo, se experimentó una disminución de 0.9% de la participación de éstos respecto a un año anterior (2007) debido a un aumento en el empleo del Gas Natural.

Esta gráfica pone nuevamente de manifiesto la dependencia sobre la explotación de recursos no renovables para la producción energética, y así enfatizar la necesidad de un uso eficiente de los mismos.

1.4 Energía y Medio Ambiente

Hasta el momento se ha proporcionado un panorama del consumo y producción de energía en México y en el mundo con la finalidad de resaltar la importancia y necesidad tanto de los estudios como de las aplicaciones del uso eficiente de energía. Sin embargo, no se debe perder de vista la generación de compuestos contaminantes relacionados con la producción y uso de la energía, los cuales se encuentran en los estados sólido, líquido y gaseoso; entre éstos los últimos se encuentran SO_2 , NO_x , CO_2 , CO , cantidades menores hidrocarburos y partículas con trazas de metales como mercurio [15].

Por lo anterior, en el tema de sustentabilidad, es necesario hacer referencia al cambio climático generado a causa de la industrialización y, con ello de la calidad de vida del ser humano a nivel mundial, ya que a esta escala se ha incrementado la emisión de CO_2 como

consecuencia del consumo de combustibles fósiles, tan sólo basta citar que de acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA) [20], entre 1971 y 2005 la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor del 90% al registrarse 27 mil millones de toneladas equivalentes de CO₂. México contribuyó en 2009 con 1.6% de las emisiones de gases de efecto invernadero ubicándose en el lugar número 13 de los países emisores.

El cambio climático como consecuencia de estas emisiones atmosféricas constituye uno de los principales desafíos del presente siglo, este fenómeno tiene evidencia científica suficiente que demuestra la estrecha asociación entre el aumento continuo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a causa de de las actividades humanas como el consumo de energía fósil o el cambio de uso de suelo y los impactos climáticos.

Entre los principales efectos del cambio climático generado a causa del aumento en la emisión de gases de efecto invernadero se pueden mencionar [21]:

- Rendimiento reducido de cosechas, especialmente en regiones en desarrollo.
- Desaparición de glaciares pequeños, escasez de agua en muchas regiones incluyendo el Mediterráneo y el Sur de África.
- Aumento del nivel del mar que amenaza ciudades importantes.
- Daño extenso a los arrecifes de coral.
- Aumento en la intensidad de tormentas, incendios forestales, sequías, inundaciones y ondas cálidas.

Según la proyección al año 2050 de la OCDE se establece que sólo si se estabiliza la concentración atmosférica de GEI a 450 ppm, se estaría en la posibilidad de evitar peores desastres asociados al cambio climático [21].

Por lo tanto, la energía además de representar un insumo fundamental de cualquier economía, representa también una de las principales fuentes de emisiones de distintos Gases de Efecto Invernadero. A pesar de la complejidad que este tema implica, el presente trabajo pretende demostrar que la eficiencia energética (a través de la exergía) de procesos contribuye en gran medida tanto a la mitigación de dicha problemática como del aseguramiento de recursos energéticos.

Una vez conocida la plataforma actual sobre la problemática en el consumo de energía como preocupación mundial, el lector comprenderá la importancia en la realización de estudios sobre Uso Eficiente de Energía mediante la aplicación de la Ingeniería. Dada la importancia de los efectos de los contaminantes atmosféricos y su interrelación con el Desarrollo Sustentable, en este trabajo se proporciona como parte del análisis, el valor exergético por concepto de emisiones atmosféricas en la producción de envases tanto en su elaboración primaria así como en el reciclaje e incineración.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO SUSTENTABLE Y RESIDUOS SÓLIDOS

2.1 Residuos Sólidos en México

Siguiendo con las diversas intersecciones que se pueden formar entre el Desarrollo Sustentable y los temas aledaños que son motivo de la presente tesis, ahora corresponde tratar sobre los residuos sólidos y el fin del ciclo de vida de botellas de cualquier tipo.

Tras la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los Residuos Sólidos Municipales (RSM), cambiaron su denominación a la de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que se definen como sigue [22]:

“Los Residuos Sólidos Urbanos son aquellos generados en casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo, de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques)” Proviene también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias.

Las definiciones sobre los Residuos Sólidos son más específicas en función de la clasificación de los mismos. Una de estas clasificaciones es según su origen, es decir, que de acuerdo a la actividad que los origina, los residuos se clasifican de la siguiente manera [23]:

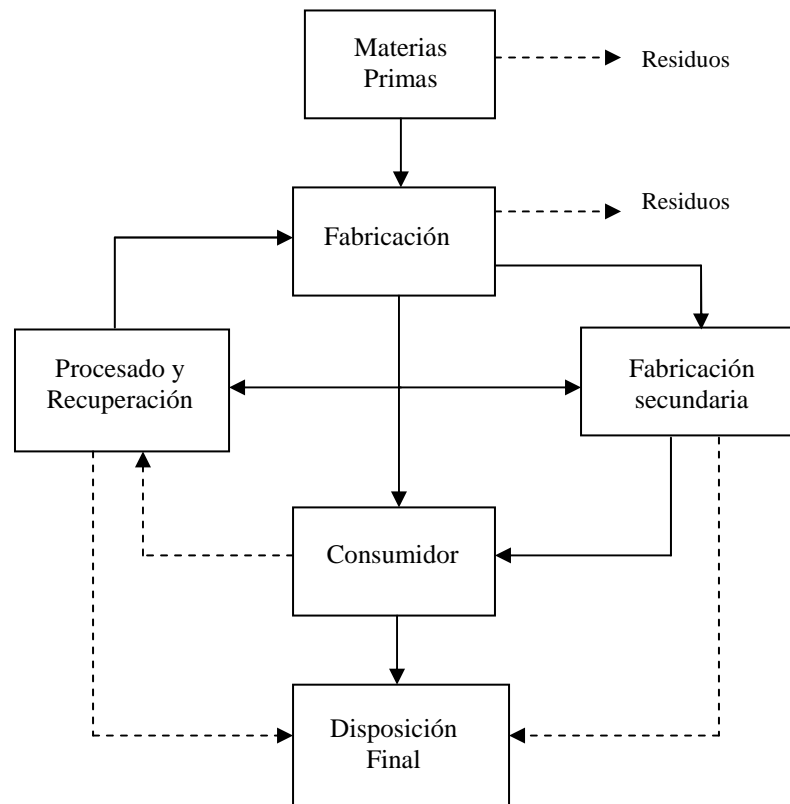
**Residuos Domésticos y comerciales:* consisten en residuos sólidos orgánicos e inorgánicos provenientes de zonas residenciales y de establecimientos comerciales. La fracción orgánica está formada por materiales como residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, madera y residuos de jardín. La fracción inorgánica está conformada por artículos como vidrio, cerámica, latas, aluminio y metales ferreos. Además de los anteriores, este tipo de residuos pueden contener materiales especiales como electrodomésticos, muebles, computadoras, equipo de cómputo, radios, televisores, pilas y baterías.

**Residuos Institucionales:* las fuentes de estos residuos incluyen centros administrativos, escuelas, cárceles y hospitales (excluyendo residuos sanitarios).

**Residuos de la Construcción y Demolición:* son los residuos procedentes de la construcción, remodelación y arreglos de viviendas, edificios u otras estructuras. Las cantidades generadas son difíciles de estimar y se componen normalmente de hormigón, armaduras, ladrillos, madera, grava, piezas de fontanería, calefacción y electricidad, vidrios rotos, plásticos, acero, etc.

**Residuos Industriales:* los residuos generados por la industria están en función de varios factores como: tipo de industria, tecnología del proceso productivo, calidad y tipo de materias primas y/o productos intermedios, combustibles utilizados, así como los envases y embalajes del proceso.

El concepto de limitación en el uso de materias primas por medio de un aumento de la tasa de recuperación y reuso de materiales de desecho se puede visualizar en la siguiente figura referente al flujo de materiales y generación de residuos sólidos propuesta por Tchobanoglous y colaboradores [24] que a pesar de ser simple como definición presenta dificultades en su aplicación por parte de la sociedad como se aprecia en la figura 2.1:



————— Materias primas, productos y recuperación de materiales

----- Materiales de desecho

Figura 2.1 Flujo de materiales y producción de residuos sólidos.

Al igual que en el resto del mundo, en México, el crecimiento en los procesos de industrialización se ha intensificado a partir de la segunda mitad del siglo pasado reflejándose en una mayor demanda de materias primas para satisfacer el consumo de bienes y servicios cada vez mayor. Entre las consecuencias de lo anterior está el evidente deterioro de las condiciones ambientales como la contaminación atmosférica y generación de residuos sólidos tanto urbanos como industriales. Este último problema está acompañado por una disposición inadecuada de los residuos a lo largo del territorio cuyos impactos directa e indirectamente sobre la salud de la población y ecosistemas de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales son [25]:

- 1) Generación de Contaminantes y Gases de Efecto Invernadero: producción de biogases a causa de la descomposición de los residuos orgánicos peligrosos por su toxicidad e inclusive por explosividad. Entre estos gases se encuentran: bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), ácido sulfhídrico (H_2S), y compuestos orgánicos volátiles como acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno. El bióxido de carbono y el metano además de alterar la calidad del aire contribuyen al calentamiento global.
- 2) Contaminación de los suelos y cuerpos de agua: generación de lixiviados debido al contacto del agua con los residuos provocando reacción, arrastre o filtrado de los materiales. Estos lixiviados contaminan los suelos y cuerpos de agua provocando su deterioro y la reducción de su productividad, representando un riesgo para la salud humana y demás organismos.
- 3) Proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades: los residuos orgánicos atraen a un numeroso grupo de especies de insectos, aves y mamíferos que pueden transformarse en vectores de enfermedades peligrosas como la peste bubónica, tifus marino, salmonelosis, cólera, amebiasis, disentería, dengue y fiebre amarilla, entre otras.

La problemática de los residuos sólidos se percibe menos alentadora si se considera que en nuestro país se registró una generación de 36.9 millones de toneladas de residuos en 2007, [25] lo que es equivalente a una producción de 101mil Ton/día. Esta cifra continúa incrementándose debido fundamentalmente al crecimiento urbano, al desarrollo industrial, y al cambio en los patrones de consumo de la población.

Las cifras actuales sobre la generación de RSU a nivel nacional presentan limitaciones importantes debido a que no se trata, por supuesto, de mediciones directas, sino de estimaciones. La estimación de la generación nacional se calcula conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985 sobre la determinación de la generación de residuos sólidos, con base en la generación promedio de residuos sólidos por habitante (medida en Kg/hab./día), a partir de información obtenida de muestreos aleatorios en campo, con duración de ocho días para cada uno de los estratos socioeconómicos de la población. A partir de las estimaciones de generación per cápita puede calcularse la generación diaria y un estimado anual nacional.

Al respecto, en la generación total de residuos en México, existen diferencias importantes por región, de acuerdo a estadísticas publicadas por SEDESOL en 2008 [26], la zona centro contribuye con la mitad de la generación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), la región norte con el 16% y el Distrito Federal con el 13% como es posible observar en el gráfico de la figura 2.2:

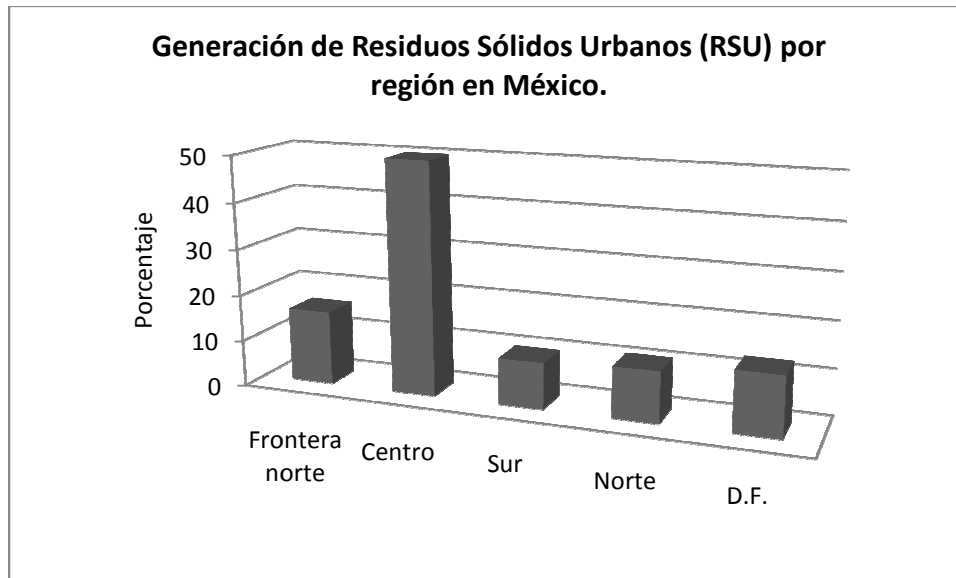


Figura 2.2 Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por región en México.
Fuente: Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2008).

Entendiéndose por zona centro los estados de Veracruz, Estado de México, Guerrero, Michoacán, Tlaxcala, Puebla, Querétaro, Guanajuato, Hidalgo, Morelos, Colima, Jalisco; Zona Sur: Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tabasco, Chiapas y Oaxaca; Zona Norte: Aguas Calientes, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Sinaloa, Nayarit, Baja California Sur; Frontera Norte: Baja California Norte, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas.

Otras características importantes de los Residuos Sólidos Urbanos en México es el papel de la urbanización y la composición de los residuos. En el periodo 1997-2007 las zonas metropolitanas aumentaron en un 48% el volumen de generación, mientras que las zonas rurales o semiurbanas presentaron un incremento del 15%. Respecto a la composición se ha encontrado que existe una correlación entre la composición de los Residuos Sólidos Urbanos y las condiciones económicas del país, aquellos con menores ingresos generan menos residuos y en sus componentes predomina la materia orgánica, en México el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre 65% y 70% en volumen durante la década de los '50 mientras que para el 2007 esta cifra se redujo al 50% [26].

2.2 Disposición Final de Residuos Sólidos: Algunas tecnologías de tratamiento

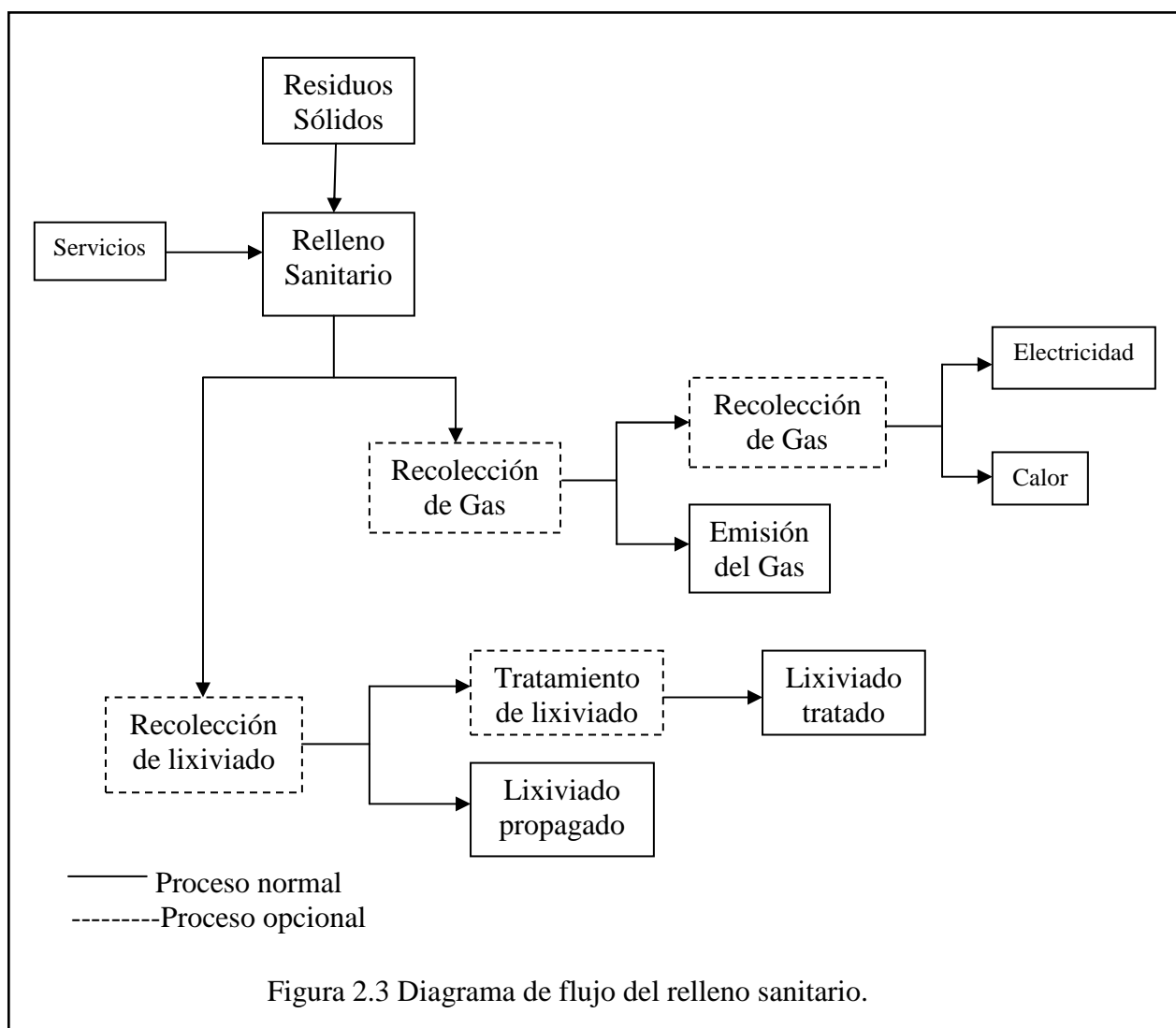
2.2.1 Relleno sanitario

Un relleno sanitario es una técnica de ingeniería para el adecuado confinamiento de los residuos sólidos urbanos, comprende el esparcimiento, acomodo y compactación de los residuos, su cobertura con tierra u otro material inerte, así como el control de los gases, lixiviados y la proliferación de vectores, con el fin de evitar la contaminación del ambiente

y proteger la salud de la población [23]. En esta definición anterior se debe entender por vector sanitario a un organismo vivo (ratas, ratones, cucarachas, moscas) que es capaz de transmitir una serie de enfermedades causadas por microorganismos (virus, bacterias, protozoos, hongos, etc.).

La obra de ingeniería consiste en preparar un terreno, colocar los residuos y extenderlos en capas delgadas, compactarlos para reducir su volumen y cubrirlos al final de cada día de trabajo con una capa de tierra de espesor adecuado.

A continuación se presenta el esquema 2.3 correspondiente al diagrama de flujo de un relleno sanitario [27]:



Los principales problemas para la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos a través de rellenos sanitarios son las emisiones de gases y lixiviados. El gas generado constituido en su mayor parte por metano (cerca de 55%) y CO₂ (cerca de 45%) es consecuencia de la

descomposición de los residuos orgánicos, mientras que los lixiviados se originan a causa del contenido de agua de los residuos y la precipitación pluvial.

2.2.2 Reciclaje

El reciclaje puede ser definido como un proceso simple o complejo que sufre un material o producto para ser reincorporado a un ciclo de producción o de consumo, ya sea éste el mismo en que fue generado u otro diferente [23].

El reciclaje de los residuos sólidos urbanos constituye una opción de solución para minimizar la problemática generada por el aumento en su generación debido a que conlleva a un ahorro en el consumo de materiales puros, de energía y de recursos naturales.

Los componentes de los Residuos Sólidos Urbanos con posibilidad de reciclaje son principalmente: papel y cartón, vidrio, metales, plásticos, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Las principales ventajas del reciclaje son la conservación de los recursos naturales y del espacio del vertedero; sin embargo la recolección y el transporte de materiales requiere cantidades sustanciales de energía y de mano de obra, e históricamente la mayoría de los programas de reciclaje han tenido y tienen subvenciones económicas. Por lo tanto, los requisitos para el éxito de un programa de reciclaje son:

- 1) La existencia de una fuerte demanda para los materiales recuperados.
- 2) Valor de mercado para los materiales que sea suficiente como para cubrir los costos de energía y transporte.

Los puntos a considerar para el reciclaje son [28]:

- 1) Identificación de los materiales que se van a desviar: los gestores de residuos procuran maximizar la vida de un vertedero y minimizar los costos de producción, por lo que a menudo dentro de un marco legislativo se requiere que se desvíen fuera de los vertederos un cierto porcentaje de los residuos sólidos recogidos. La complejidad estriba en el hecho de que algunos materiales no se pueden transportar de forma rentable.
- 2) Identificación de las posibilidades de reutilización y reciclaje: los mercados para materiales recuperados existen solamente cuando los fabricantes o procesadores necesitan éstos o pueden utilizarlos como sustitutos rentables de materias primas, por lo tanto, el mercado depende de la calidad de los materiales, de la capacidad global de la industria y del costo de materias primas en competencia. En la mayoría de los casos los materiales recuperados son inferiores en calidad respecto a los materiales vírgenes, por lo que el precio en el mercado tiene que ser atractivo para

los compradores. También se crean mercados con una legislación que desarrolle una demanda a largo plazo además de los avances tecnológicos.

- 3) Especificaciones de los materiales recuperados: los procesadores y usuarios finales de los materiales recuperados requieren que los materiales sean homogéneos y se encuentren libres de contaminantes que produzcan defectos en los productos o daños en la maquinaria, asimismo, muchos compradores necesitan además que el material empacado se presente en forma compactada con determinados tamaños y pesos específicos.

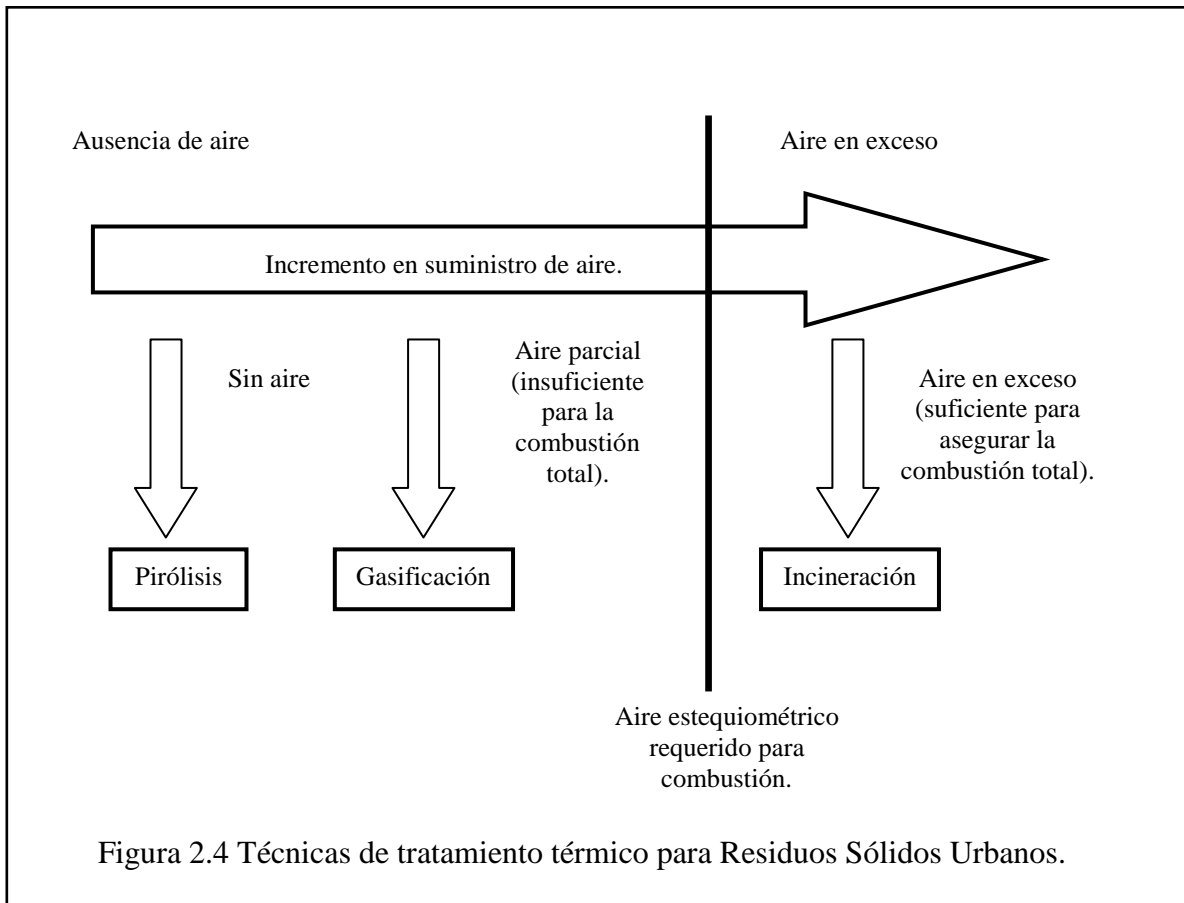
2.2.3 Tratamiento Térmico de Residuos Sólidos Urbanos

El procesamiento térmico de los residuos sólidos utilizado para la reducción en volumen y la recuperación de energía es un elemento importante en muchos sistemas de gestión integral. El procesamiento térmico de los residuos sólidos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos gaseosos con la simultánea o subsecuente emisión de energía en forma de calor.

La combustión con la cantidad de oxígeno exactamente necesaria para la combustión total se conoce como combustión estequiométrica. La combustión con oxígeno en exceso sobre las necesidades estequiométricas se denomina combustión con exceso de aire. La gasificación es la combustión parcial de los residuos sólidos bajo condiciones subestoequiométricas para generar un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. Por último, la pirolisis es el proceso térmico de residuos en ausencia completa de oxígeno.

La emisión de compuestos orgánicos de la familia de las dioxinas y furanos se ha convertido en una controversia compleja al hablar del Procesamiento Térmico de los Residuos Sólidos Urbanos. Una dioxina es un miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzodioxina (PCDD) la cual está constituida por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un par de átomos de oxígeno. Respecto a los furanos, la familia policlorodibenzofurano (PCDF) tiene una estructura similar aunque solamente un átomo de oxígeno une dos anillos del benceno. La importancia de las familias PCDD y PCDF de compuestos orgánicos consiste en que algunos de sus isómeros se encuentran entre las sustancias más tóxicas que existen [28].

La principal diferencia entre las técnicas de tratamiento térmico se muestra en la figura 2.4 en términos de los niveles de aire presente [29]:



A continuación se proporciona una breve descripción de éstas alternativas de Tratamiento Térmico de Residuos Sólidos Urbanos.

2.2.3.1 Incineración

La incineración es analizada en este trabajo ya que, aunque el reciclaje constituye una buena opción en términos de recuperación de energía, debe tomarse en cuenta que los aditivos de fabricación para ciertos plásticos los convierte en materiales no óptimos para tal proceso debido a la presencia de contaminantes así como al deterioro de la fibra, por lo que se pretende contar con resultados para ambas alternativas y de esta manera enriquecer los criterios en la toma de decisiones respecto a cada material.

La incineración se puede definir como un proceso de combustión de los Residuos Sólidos a temperaturas superiores a 850°C con un exceso de oxígeno de 6% con respecto al estequiométrico, resultando un proceso exotérmico que permite recuperar el poder calorífico del residuo en forma de calor. La temperatura de los incineradores es insuficiente para quemar o incluso fundir vidrio.

Energéticamente, la incineración recupera una gran cantidad de energía aunque con emisiones de CO₂ considerables, lo cual constituye un buen objetivo para futuras investigaciones.

Una de las mayores ventajas brindadas por la incineración es que a través de ésta se puede alcanzar una reducción considerable de residuos hasta un rango de 10-25% del peso inicial de los desechos cargados en el incinerador [24]:

En la figura 2.5 se muestran las etapas a las cuales son sometidos los residuos sólidos para ser incinerados [23]:

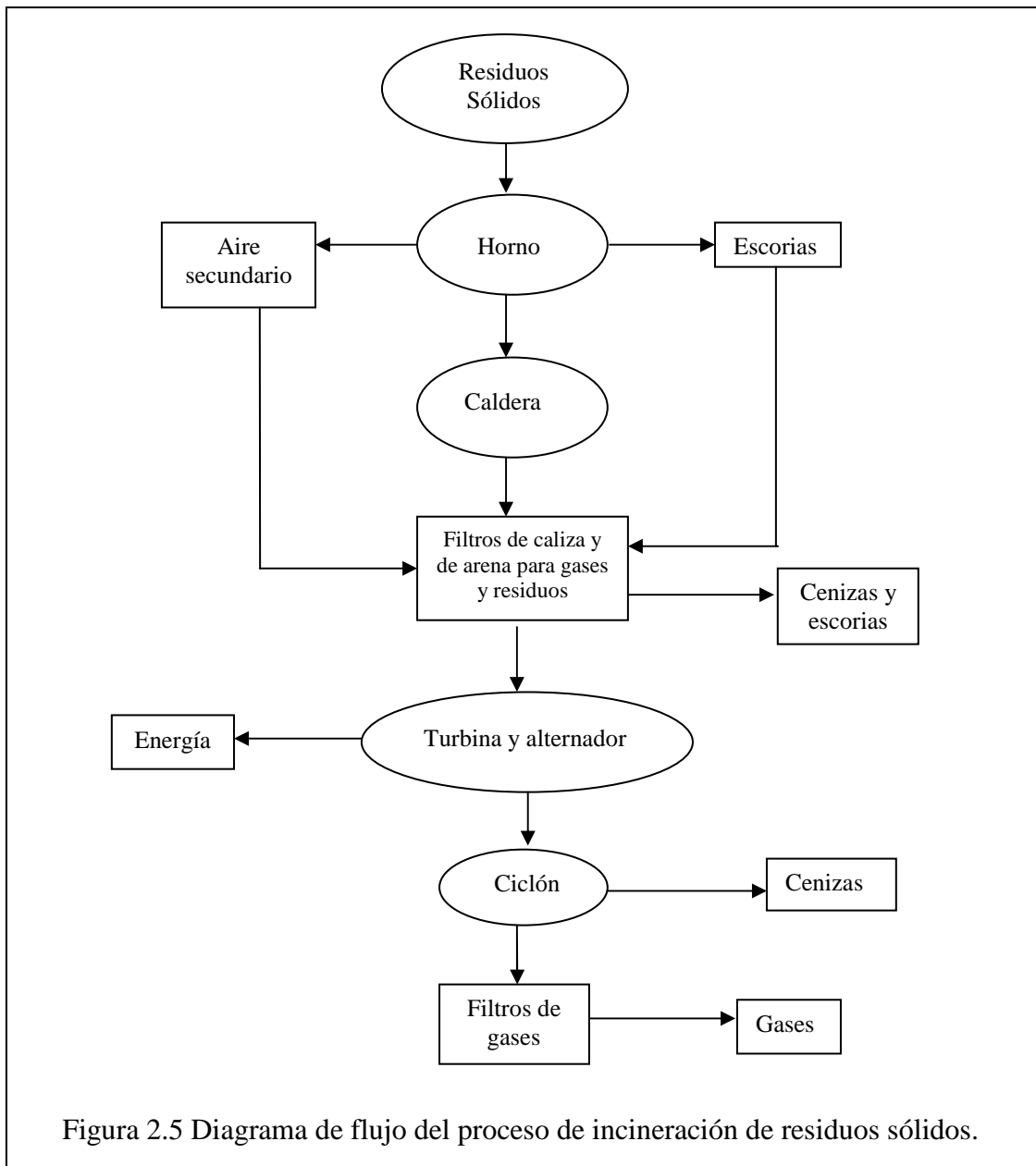


Figura 2.5 Diagrama de flujo del proceso de incineración de residuos sólidos.

El poder calorífico del material a incinerar y el potencial contaminante de las emisiones son los principales motivos que han hecho evolucionar los sistemas de incineración hacia procedimientos capaces de alcanzar mayores rendimientos en la combustión y mayor eficacia en la eliminación de contaminantes.

La generación de energía obtenida a partir de la incineración de Residuos Sólidos depende de factores como la composición media de los residuos, la humedad, la circulación de aire en la combustión, etc.; sin embargo, de acuerdo a datos recolectados de incineradoras, la generación de energía oscila en un rango de 250-450 KWh/ton. residuo, de la cual entre 10-20% se aprovecha para autoabastecimiento.

Los principales componentes de un sistema de recuperación de energía por incineración son las calderas para producción de vapor, las turbinas de vapor y de gas para potencia motriz y los generadores de electricidad para la conversión de potencia motriz en electricidad.

En México, de acuerdo al Instituto Nacional de Ecología [30] existe un total de 43 plantas incineradoras, de las cuales 85% son utilizadas para residuos biológico-infecciosos y el 15% restante para residuos industriales, por lo que en este país los residuos urbanos no se tratan por medio de esta alternativa. Los niveles de desempeño posibles a alcanzar para emisiones al aire en incineradores de desechos son 0.01-0.1 ngEQT/Nm³.(NOM-098-SEMARNAT-2002. “Regulación de la Incineración de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos en México”).

2.3 Recolección y Reciclaje de Residuos Sólidos Urbanos en México

En nuestro país para 1996 se recolectaba cerca de 70% de los residuos generados, cifra que para 2007 aumentó a 88.4%. Sin embargo, esta cifra también difiere si se trata de zonas metropolitanas, ciudades medias o pequeñas áreas urbanas. En las grandes zonas metropolitanas del país, la cobertura en la recolección de los residuos alcanza 95%, en ciudades medias varía entre 75% y 85%, mientras que en las pequeñas áreas urbanas el dato corresponde a un rango entre 60% y 80% [25].

El volumen de RSU que se recicla en México aún sigue siendo bajo, de acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) [26] los datos obtenidos de los sitios de disposición final para 2007 se recicló 3.3% del volumen de los Residuos Sólidos Urbanos generados aunque esta cifra podría ser mayor y alcanzar el 10% debido a que muchos de los residuos reciclables son recuperados directamente en los contenedores y vehículos de recolección. Del volumen de materiales reciclados, el mayor porcentaje corresponde al papel, cartón y sus derivados (38.7%), seguidos por el virio (34.7%) y metales (26%) estando en los últimos lugares plásticos (0.5%) y textiles con (0.2%) (figura 2.6).

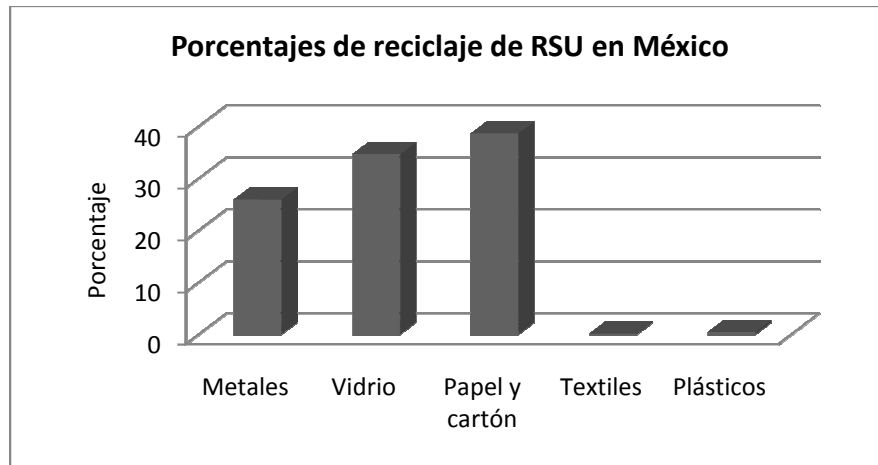


Figura 2.6 Porcentajes de reciclaje de RSU en México.
Fuente: Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2007)

Como se analizará más adelante, el reciclaje del vidrio y aluminio representa para los fabricantes ahorros energéticos relevantes así como en costos de materias primas, esto explica el comportamiento de reciclaje de vidrio y metales en nuestro país. En tanto que los plásticos tienen un porcentaje de reciclaje muy pequeño debido principalmente a la falta de rentabilidad resultante de los altos costos de transporte y bajos precios de venta de este material.

2.4 Legislación sobre Residuos Sólidos Urbanos

La legislación desempeña un papel crucial en la Gestión de Residuos Sólidos ya que la población se resiste cada vez al establecimiento de nuevas unidades de tratamiento y disposición final cerca de sus comunidades provocando que los costos de esta Gestión se incrementen.

A nivel mundial los principios que sustentan el manejo ambientalmente adecuado de los residuos de la Agenda o Programa 21 de la Organización de las Naciones Unidas son [31]:

- Principio de Reducción en la Fuente: implica que se debe minimizar la generación de los residuos tanto en cantidad como en su potencial de causar contaminación ambiental utilizando diseños adecuados de procesos y productos.
- Principio de Inventario de Ciclo de Vida: demanda la realización del inventario a fin de que las sustancias y productos se diseñen y manejen de manera que se reduzca al mínimo sus impactos adversos al ambiente en cada una de las fases del ciclo de vida: generación, uso, recuperación y disposición final.
- Principio de precaución: plantea la necesidad de adoptar medidas preventivas, considerando los costos y beneficios de la acción o inacción, cuando exista evidencia científica, aún limitada, para sospechar que la liberación al ambiente de una sustancia, residuo o energía, pueden causar daños a la salud o al ambiente.

- Principio de control integral de la contaminación: requiere que el manejo integral de los residuos se realice con un enfoque multimédios, para evitar la transferencia de contaminantes de un medio a otro.
- Principio de estandarización: establece la necesidad de contar con estándares o normas que permitan el manejo ambientalmente adecuado de los residuos en todas las fases de su ciclo de vida.
- Principio de autosuficiencia: demanda que todos los países cuenten con la infraestructura necesaria para asegurar que los residuos que generen se manejen de manera ambientalmente adecuada en su territorio.
- Principio de proximidad: mediante el cual se busca que el acopio, tratamiento o disposición final de los residuos tenga lugar tan cerca de la fuente generadora como sea posible y que sea técnica y económicamente factible.
- Principio de soberanía: bajo el cual cada país debe tomar en consideración sus condiciones políticas, sociales y económicas, al momento de establecer su estructura nacional de manejo integral de residuos.
- Principio quien contamina paga: hace responsable de remediar las consecuencias de la contaminación a quien la produzca.
- Principio de participación pública: demanda asegurarse que al diseñar e instrumentar los sistemas de manejo integral de residuos se informe e involucre a la población.

En los principios descritos anteriormente se entiende como Manejo Ambientalmente Adecuado como: la adopción de todos los pasos prácticos necesarios para asegurar que no se provoquen efectos adversos a la salud o al ambiente como resultado de dicho manejo.

Por su parte, la EPA (Environmental Protection Agency), ha expuesto en términos generales algunas opciones de acción para estimular la reducción en origen de los residuos sólidos. Estas acciones que requieren una nueva y eficiente legislación a nivel federal incluyendo los siguientes puntos [32]:

- *Regulaciones sobre los constituyentes de los productos*: esta opción de reducción en origen tiene como enfoque aquellos constituyentes que se sabe estarán presentes en el flujo de residuos tóxicos.
- *Nuevos Procesos para aprobar productos*: al tratar de introducir un nuevo producto, los fabricantes estarían obligados por el gobierno, a ensayar y demostrar el impacto de dichos productos en el flujo de residuos, asimismo, tendrían que determinar el comportamiento del producto en un ambiente de vertido, en una incineradora y en un sistema de reciclaje.
- *Revisiones de productos existentes*: en este punto el gobierno estaría obligado a establecer criterios para identificación de productos con posibles impactos potenciales al medio ambiente debido a su toxicidad residual.
- *Restricciones de compra*: la propuesta consiste en que el gobierno adquiriera un verdadero control sobre la compra de grandes cantidades de bienes para fomentar la

obtención de éstos que deriven en residuos con menor toxicidad y volumen y con ello modificar las especificaciones de compra que hasta ahora sólo tratan el rendimiento de los materiales durante su servicio.

Con base a estos puntos de propuestas se puede concluir que, en términos optimistas, el problema de los residuos sólidos sería menor si los productores de envases adoptaran una política de reducción en peso y volumen de los envases necesarios y de eliminación de excedentes. Asimismo, de que los consumidores tuviesen conciencia de compra encaminada a reducir los residuos de aquellos productos y envases inútiles que cuando llegan a casa se convierten en residuos sólidos; es decir, se pueden reducir los residuos aunque no evitar que existan.

En México existe un Ordenamiento Ecológico y Política Ambiental como “ instrumento cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos”.

Este ordenamiento ecológico según el reglamento de la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente) en la materia, se divide en cuatro fases:

- *Caracterización:* Se describen los sistemas natural, social y productivo; así mismo, se divide el Estado en unidades territoriales (unidades de gestión ambiental) de acuerdo con los atributos físico-biológicos que ayudan a deducir su aptitud y se identifican los intereses y la visión que la sociedad tiene sobre los recursos.
- *Diagnóstico:* Se analizan las interacciones entre los tres sistemas que explican el estado en el que se encuentra actualmente cada uno de ellos. Por ejemplo, se define la mejor aptitud del suelo para diferentes actividades y se identifican áreas de conflicto entre ellas.
- *Pronóstico:* Con base en la información generada en el diagnóstico, se prevén los posibles conflictos y cambios en los recursos en el caso de que las tendencias actuales se mantengan o de que se realicen acciones para su gestión. Por ejemplo, el aumento de áreas erosionadas, el agotamiento de recursos no maderables, oportunidades de mercado para alguno de los sectores productivos, etc.
- *Propuesta:* Se deciden las políticas y lineamientos (estrategias y programas) aplicables a cada una de las unidades de gestión ambiental para alcanzar la visión expresada en la etapa de caracterización, maximizando el consenso y minimizando el conflicto entre sectores.

Enseguida se presenta a manera de tabla 2.1 del marco legal mexicano para el manejo de los residuos sólidos urbanos [31]:

Tabla 2.1 Marco Legal Mexicano para Manejo de Residuos Sólidos Urbanos.	
<i>Ordenamiento</i>	<i>Descripción</i>
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Indica que los servicios públicos municipales que deben ser prestados por los ayuntamientos, entre ellos el servicio de limpia.
Ley General de Salud	Establece las disposiciones relacionadas al servicio público de limpia en donde se promueve y apoya el saneamiento básico.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Plantea que los sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos quedan sujetos a autorización y legislación estatal.
Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas	Establecen la forma y procedimientos aplicables al manejo y disposición de los residuos sólidos no peligrosos.
Constitución Política Estatal	Hace referencia a las facultades que tienen los ayuntamientos para prestar el servicio de limpia pública.
Ley Estatal de Protección al Ambiente	Establece disposiciones de observancia obligatoria para cada Estado, teniendo como objetivo la prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico.
Ley Orgánica del Municipio Libre	Establecen atribuciones de los ayuntamientos para nombrar las comisiones que atiendan los servicios públicos.
Reglamento de Limpia	Regula los aspectos administrativos, técnicos, jurídicos y ambientales para la prestación del servicio de limpia pública

Como se ha venido diciendo, la intensificación de los problemas ambientales se debe, además del incremento en la generación de residuos (a raíz del proceso de industrialización), a la disposición inadecuada de éstos, lo cual impacta directa e indirectamente no sólo la integridad de los ecosistemas, sino también la salud de la población. El tratamiento de residuos comprende desde su generación, almacenamiento, transporte y tratamiento hasta su disposición en algún sitio, cada una de estas etapas contribuye al aprovechamiento de recursos y a la disminución de contaminación. Sin embargo, a lo largo del territorio mexicano aún no se cuenta con la infraestructura para llevar a cabo una disposición adecuada, por lo que los residuos se vierten sobre depresiones naturales de terrenos, por lo que actualmente la mejor solución para la disposición final de los residuos son los rellenos sanitarios.

La interrelación entre la problemática generada por los Residuos Sólidos Urbanos y el Desarrollo Sustentable descrita en este capítulo complementa la importancia de los estudios de uso eficiente de energía en la conservación de recursos no renovables tratados anteriormente. Entre las diversas aristas del Desarrollo Sustentable en relación a los envases, la ambiental comprende tanto las consecuencias originadas por la disposición inadecuada de éstos, así como las alternativas disponibles para la reducción de tales efectos.

CAPÍTULO 3

TERMODINÁMICA Y EXERGÍA

Continuando con las intersecciones entre diferentes disciplinas y el desarrollo sustentable, ahora se tratará a la termodinámica y la exergía que por sí mismas hacen un aparatado de esta tesis que resulta necesario describir. En realidad, establecer el vínculo entre desarrollo sustentable y exergía se da en forma natural y obvia, pues hacer un uso eficiente de la energía es contribuir al desarrollo sustentable, sabiendo que el término ‘uso eficiente de energía’ se relaciona estrictamente con los dos principios fundamentales de la termodinámica y, por lo tanto, con la exergía, como podrá observarse a continuación.

Así que en este capítulo se hace referencia a la Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica debido a que el concepto principal de este trabajo, *exergía*, precisamente se encuentra basado en esos postulados, por lo que una vez entendidos dichos fundamentos se podrá abordar este tema así como sus aplicaciones dentro del uso eficiente de energía.

3.1 Introducción

La energía juega un papel clave en el análisis de procesos, sistemas y dispositivos en los cuales ocurren transferencias y transformaciones de la misma. La revolución industrial se vio impulsada por el descubrimiento de cómo explotar la energía a gran escala y cómo convertir el calor en trabajo; la naturaleza permite la conversión de completa de trabajo en calor, pero éste no puede ser completamente transformado en trabajo.

Para satisfacer las necesidades de energía de la sociedad en base a las condiciones actuales de uso a gran escala de recursos finitos, es imprescindible que la sociedad busque la máxima eficiencia para optimizar el beneficio derivado del uso de estos recursos no renovables. En este sentido, es posible usar los principios de la termodinámica para llevar a cabo procesos con la mayor eficiencia y el menor gasto. La Termodinámica puede contribuir de manera valiosa al logro de semejante meta, en particular ayudando a identificar las principales fuentes de ineficiencia y gasto en las múltiples aplicaciones de ingeniería que implica el uso de energía.

El concepto de energía fue introducido por primera vez por Newton cuando propuso la existencia de las energías cinética y potencial; sin embargo la unificación del concepto de energía en Física surgió hasta mediados del Siglo XIX y es considerado uno de los mayores descubrimientos científicos de ese siglo. En la actualidad la energía es un concepto familiar para todos que parece ser entendido de manera intuitiva aunque todavía se tiene dificultad para definirla precisamente.

La energía es una cantidad escalar que no puede ser observada directamente registrada y evaluada, el valor absoluto de la energía de un sistema es difícil de medir mientras que el cambio de ésta es relativamente fácil de evaluar [33].

Las manifestaciones de la energía suceden en muchas formas, en Termodinámica las formas de ésta pueden ser clasificadas dentro de dos grupos:

- **Energía Macroscópica:** ésta corresponde a un sistema de procesos con respecto a un marco de referencia, por ejemplo, las energías cinética y potencial. La energía macroscópica de un sistema está relacionada con la influencia de efectos externos como la gravedad, el magnetismo, electricidad y tensión superficial.
- **Energía Microscópica:** es aquella relacionada con la estructura molecular y el grado de actividad molecular de un sistema siendo independiente de un marco de referencia externo. La suma de todas las formas de energía microscópica de energía de un sistema corresponde a su energía interna del mismo. Dicha energía interna del sistema depende de cualidades inherentes, o propiedades de los materiales en el sistema tales como composición y forma física, así como variables ambientales (temperatura, presión, campo eléctrico, campo magnético, etc.). Asimismo, la energía interna se manifiesta en varias formas incluyendo la energía mecánica, química, eléctrica, magnética, superficial y térmica.

Como se mencionó anteriormente, la energía macroscópica se clasifica en [34]:

- a) **Energía Cinética:** energía que posee un sistema como resultado de su movimiento respecto a alguna referencia. Una vez alcanzada y mantenida una velocidad, la energía cinética permanece constante a excepción de que cambie la rapidez y/o la masa del cuerpo.
- b) **Energía Potencial:** energía que posee un sistema como resultado de su elevación en un campo gravitacional. Así, 1 Kg. de masa a 100 metros del suelo tiene una energía potencial mayor que dicha masa a nivel del suelo.

Para obtener la máxima conversión de energía se deben tener las siguientes consideraciones:

- 1) Los procesos tendrían que ser completamente reversibles.
- 2) El límite superior de conversión depende de parámetros termodinámicos del sistema (en el cual la energía se encuentra almacenada) y aquellos correspondientes al ambiente.
- 3) El análisis debe involucrar el uso de la Segunda Ley de la Termodinámica.
- 4) La conversión está en general ligada a cambios en entropías de los sistemas bajo interacción.

Así, como parte de los fundamentos termodinámicos es necesario conocer dos tipos de procesos de los cuales se continuará haciendo mención y que son *Procesos Reversibles e Irreversibles*. Supóngase que el gas contenido en un cilindro aislado (sistema) se expande

contra un pistón y transfiere energía mecánica al exterior, si el pistón se mueve sin rozamiento dentro del cilindro y con lentitud suficiente para que se puedan omitir las pérdidas por viscosidad, el trabajo efectuado por el gas será igual a la energía mecánica que recibe el exterior misma que puede ser almacenada (a través del levantamiento de un peso, por ejemplo) y utilizarse para volver al sistema y el exterior a su estado original. Por otra parte, si hay rozamiento entre el pistón y el cilindro, parte del trabajo hecho por el gas en su expansión se convertirá en energía térmica y cuando el pistón regresa no todo el trabajo hecho por el exterior será transferido al gas debido a las pérdidas causadas por rozamiento. Por lo tanto, en el dispositivo pistón-cilindro el efecto global del ciclo expansión-compresión con rozamiento es una transferencia neta de energía mecánica al gas y una transferencia neta de energía térmica que vuelve al exterior. De esta manera se puede distinguir que [35]:

- *Proceso reversible*: es aquel que ocurre de tal modo que tanto el sistema como su exterior pueden volverse a su estado original, condición que no se puede realizar a menos que todos los cambios asociados al proceso (tanto en el sistema como en el exterior) ocurran sin efectos de rozamiento. Así, la dirección de un proceso reversible puede invertirse en cualquier punto por un cambio infinitesimal en las variables externas.
- *Proceso irreversible*: supone siempre la degradación de un potencial de energía sin producir la cantidad máxima de trabajo o un aumento correspondiente en otro potencial de energía diferente de la temperatura.

3.2 Entalpía y Primera Ley de la Termodinámica

3.2.1 Entalpía

Antes de definir entalpía es necesario conocer el significado de otra propiedad llamada *energía interna*, la cual describe la cantidad total de energía que posee la materia en virtud de su existencia cuyo valor queda determinado una vez que queda especificado el estado del sistema.

Ahora bien, cuando se requiere evaluar la energía contenida en un cuerpo de volumen **V**, por ejemplo, un gas contenido en un recipiente, tiene que considerarse que el gas tiene que empujar los alrededores para tener él mismo un lugar. Con la presión **P** sobre el gas, el trabajo requerido para hacerse un lugar es **PV**, el término **PV** también es conocido como trabajo de flujo. Por ello, la energía total de un cuerpo es su energía interna más la energía adicional atribuida por tener un volumen **V** a la presión **P**. Esta energía total es llamada *Entalpía (H)* [36]:

$$H = U + PV \dots \dots \dots ec. 3.1$$

La entalpia es una propiedad extensiva cuyo valor queda completamente determinado una vez fijado el estado del sistema [35].

En el análisis de los sistemas abiertos, es conveniente emplear el cambio en la entalpía en lugar del cambio en la energía interna, debido a que la entalpía considera el trabajo de flujo (PV) [36].

3.2.2 Primera Ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica provee el concepto de energía, el cual es definido como la capacidad que tiene un sistema para desarrollar un trabajo.

Esta ley establece que la cantidad de energía existente en el universo es constante, sin importar las transformaciones que ésta sufra, es decir, **“La energía no se crea ni destruye, solo se transforma”**. Esto quiere decir que aunque la energía tome distintas formas, la cantidad total de energía es constante, y cuando la energía desaparece en una forma, aparece simultáneamente en otras formas [37]. Por lo tanto, el cambio en la energía total de un sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial ($\Delta U, \Delta EC, \Delta EP$, *respectivamente*):

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + EP \dots \dots \dots ec. 3.2$$

Donde:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \dots \dots \dots ec. 3.3$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2) \dots \dots \dots ec. 3.4$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1) \dots \dots \dots ec. 3.5$$

Cuando se trabaja con un sistema cerrado, considerando que los cambios de energía potencial y energía cinética cuando ocurre un cambio de estado son despreciables, la energía que se transfiere es de dos tipos, calor (Q) y trabajo (W). Bajo la notación donde el calor que entra al sistema es positivo y el trabajo que sale del sistema es negativo la primera ley se escribe como:

$$\Delta U = Q - W \dots \dots \dots ec. 3.6$$

donde U, es la energía interna, ésta representa los diferentes tipos de energía, que a nivel intermolecular e intramolecular contiene el sistema; como la energía asociada al espín molecular, enlace molecular, momento bipolar magnético, translación molecular, rotación molecular, vibración molecular, entre otras.

El calor y el trabajo se refieren al flujo de energía a través de la frontera del sistema. Estas formas de energía no se almacenan, por lo tanto, no son características propias del sistema, es decir, no se puede describir a un sistema en función de un “contenido de trabajo” o de un “contenido calórico”.

Considerando que el sistema opera a condiciones de flujo continuo en estado estacionario, es decir que las condiciones y rapidez de flujo en todos los puntos a lo largo de la trayectoria de flujo son constantes respecto al tiempo, la primera ley se escribe como:

$$\Delta H = Q - W_U \dots \dots \dots ec. 3.7$$

W_U es toda la transferencia de trabajo entre el sistema y los alrededores excepto el trabajo expansión-compresión; ΔH es el cambio de entalpía que ocurre debido a un proceso que opera a las condiciones antes mencionadas.

Considerando el caso más general, un sistema abierto que opera a condiciones de flujo en donde las propiedades del mismo son función del tiempo, para un cambio diferencial de estado, la variación de la entalpía con respecto al tiempo para gases o soluciones ideales se escribe de la siguiente manera [38]:

$$\frac{dH}{dt} = \dot{Q} - \left\{ \sum_k^n \sum_i^m \dot{N}_{ik} H_{ik} \right\} - \dot{W}_U \dots \dots \dots ec. 3.8$$

donde la suma sobre k hasta n representa las corrientes, mientras que la suma sobre i hasta m representa las especies de cada corriente, \dot{N}_{ik} es el flujo molar, H_{ik} es la entalpía molar. Por lo tanto, \dot{N}_{ik} es el flujo molar de la especie i en la corriente k , mientras que H_{ik} es la entalpía de la especie i en la corriente k . La suma es sobre todas las corrientes de entrada y las de salida.

La primera Ley de la Termodinámica sólo afirma que un aumento en alguna de las formas de energía está acompañado por una disminución en alguna otra forma, pero no enuncia ninguna restricción sobre los tipos de conversiones de energía que pueden ocurrir, no hace distinción entre el trabajo y el calor. Existe una diferencia muy importante entre el trabajo y el calor, diferencia que no se evidencia en la primera Ley: teóricamente es posible convertir completamente el trabajo en calor, prácticamente es imposible convertir completamente el calor en trabajo sin modificar los alrededores [39].

3.3 Entropía y Segunda Ley de la Termodinámica

3.3.1 Entropía

El concepto de entropía fue sugerido por primera vez por el físico alemán Clausius y se concebía, en principio, en el sentido puramente macroscópico. Posteriormente a través de la comprensión de la naturaleza microscópica de la materia, así como la aplicación de la mecánica estadística y cuántica a la estructura de la materia se ha llegado a una interpretación microscópica de la entropía considerablemente más reveladora.

La *entropía* es una medida cuantitativa de la degradación que sufre la energía como resultado de cambios en el universo [35]. En un cambio reversible, la entropía total del universo permanece fija; mientras que en un cambio irreversible la entropía total del universo aumenta en proporción directa a la cantidad de energía mecánica degradada a forma térmica.

3.3.2 Segunda Ley de la Termodinámica

“En un proceso espontáneo disminuye la capacidad de realizar trabajo del universo”; esto es porque para "desordenar" algo siempre se necesita energía, por lo tanto, la energía utilizada para el desorden ya no estará disponible para realizar trabajo [40].

La propiedad de estado que se definió para estudiar el comportamiento que anteriormente se ha descrito fue la entropía (S) [36].

Si un sistema va del estado 1 al estado 2, ΔU se encuentra al medir Q y W hacia ó desde el sistema y después se utiliza la expresión de la primera ley, $\Delta U=Q-W$. De manera similar, el cambio de entropía al ir del estado 1 al estado 2 se encuentra como sigue:

$$\Delta S_{\text{sistema } 1 \rightarrow 2} = \int_{\text{estado 1}}^{\text{estado 2}} \frac{dQ_{rev}}{T_{\text{sistema}}} \dots \dots \dots ec. 3.9$$

Considerando un sistema abierto que opera a condiciones de flujo inestables, para un cambio diferencial la segunda ley de la termodinámica se escribe de la siguiente manera: [38]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} - \left\{ \sum_k^n \sum_i^m \dot{N}_{ik} S_{ik} \right\} + \dot{S}_{GEN} \dots \dots \dots ec. 3.10$$

donde \dot{S}_{GEN} es la entropía generada debido a las irreversibilidades del proceso, y S_{ik} es la entropía de la especie i en la corriente k .

La relación que se establece entre la energía útil que sale de un convertidor respecto de la que ingresó es siempre inferior a 1. De manera que la utilización de cualquier combustible significa, forzosamente, un grado de desperdicio que puede, eventualmente, convertirse en contaminación si el ecosistema no es capaz de absorberla a la velocidad en que se genera.

De los seres vivos, las plantas más eficientes en términos energéticos llegan a producir, a través de la fotosíntesis, cerca del 2% de energía respecto a la recibida como luz solar; los herbívoros al alimentarse de plantas apenas logran un 10% respecto a lo capturado de las mismas, y por último los carnívoros aprovechan un 10% de lo anterior [41]. El desperdicio de energía es, por lo tanto, natural; sin embargo, el ser humano tiene la posibilidad de orientar sus esfuerzos productivos y hábitos de consumo para minimizar esta tendencia natural de degradación.

Por tanto, en base a la segunda ley, se pueden establecer las condiciones en las que sea “prudente”, pero sobretodo, “inteligente”, el uso de los recursos de energéticos disponibles para una aplicación determinada.

La postulación de las dos primeras leyes de la termodinámica cristalizó en 1824 cuando el físico francés Sadi Carnot (1796-1832) escribió los resultados de su investigación de los flujos energéticos de la máquina de vapor.

En base a los enunciados de la primera y segunda leyes de la Termodinámica es posible citar a manera de resumen que:

Primera Ley de la Termodinámica: “La energía se conserva”.

Segunda Ley de la Termodinámica: “La energía se degrada”.

Según lo dicho anteriormente, en los procesos reales, la energía no es destruida, sino transformada en otras formas, cada vez menos aptas para realizar otros procesos; es por ello que además de la energía, es necesario introducir un concepto adicional para caracterizar la calidad del tipo de energía en virtud de diversas consideraciones: *la exergía*.

3.4 Energía Libre de Gibbs

La capacidad de una reacción espontánea para liberar trabajo útil puede interpretarse desde el punto de vista de una propiedad fundamental que se llama energía libre de Gibbs (G). (Atkins, 1986) :

$$G = H - TS \dots \dots \dots ec. 3.11$$

La variación de la energía libre de Gibbs entre productos y reactivos en procesos isotérmicos, se puede escribir como:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T\Delta S_r \dots \dots \dots ec. 3.12$$

donde el subíndice r indica reacción química.

La expresión termodinámica de variación de energía libre de Gibbs general para procesos isotérmicos:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots \dots \dots ec. 3.13$$

La energía libre de Gibbs puede ser utilizada para explicar del comportamiento de polimerización y depolimerización. A fin de que una polimerización sea termodinámicamente factible, el cambio en la energía libre de Gibbs debe ser negativo, es decir, $\Delta G_p < 0$. Si ΔG_p es positivo, será favorecida la depolimerización. Cualquier factor que reduce la entalpía o incrementa la entropía de especies particulares en el sistema desplazará el equilibrio a favor de éstas.

3.5 Historia de la Exergía

A lo largo de los años los conceptos de exergía e irreversibilidad han dado lugar a una variedad de conceptos, técnicas y criterios de desempeño. Aunque el método de exergía es considerado generalmente como una técnica nueva, los primeros intentos de evaluación de varias formas de energía respecto a su conversión están directamente conectados con la formulación de la segunda ley de la termodinámica. Las primeras contribuciones, desde 1868, al concepto de “disponibilidad” de energía para conversión en trabajo son debidas a Clausius, Tait, Thomson, Maxwell, Gibbs, así como al documento de Gouy “On usable energy” publicado en 1889 que ha sido considerado como la cuna del concepto de “energía disponible”, por su parte Stodola aparentemente con total independencia desarrolló el concepto de “energía técnica libre” [42]. Posteriormente el desarrollo fue lento hasta 1930 cuando el interés en la aplicación técnica de estos conceptos fue estimulado por el crecimiento industrial. Los trabajos de Bosnjakovic publicados en 1938 y 1939 marcaron una nueva era en el desarrollo de la segunda ley de la termodinámica, los documentos realizados fueron una importante contribución a la formulación de un nuevo criterio de desempeño y evaluación de perfección termodinámica de procesos; aunque este progreso fue interrumpido por la segunda guerra mundial retomándose en 1950 con gran auge. Rant en 1956 acuñó el concepto de exergía el cual ha adquirido gran aceptación reemplazando los términos usados en diferentes lenguajes como “disponibilidad”, “energía disponible”, “energía útil”, y “capacidad de trabajo”. Otros avances de importancia en el tema son “Exergy” realizado por los profesores J. Szargut y R. Petela, publicado en 1965 donde se abarcan procesos mecánicos y plantas de energía con tablas de exergía química estándar, así como la contribución del profesor Brodyanskii a través de su trabajo “Exergy method of Thermodynamic analysis” en 1973 donde se hace referencia a procesos criogénicos, refrigeración, y destilación.

3.6 Definición de Exergía

Consideremos un sistema cerrado que puede interactuar con un ambiente de referencia. En teoría, un ambiente de referencia, es un sistema que permanece esencialmente en un estado de completo equilibrio termodinámico a pesar de los flujos finitos de energía (calor y trabajo) y masa entre él y el sistema. El aire ambiente (o atmosférico) se puede considerar como un ambiente de referencia ya que es improbable que su presión y su temperatura cambien de manera significativa debido a una interacción de calor o trabajo con sistema finito dado [42].

La situación descrita se ilustra en la figura 3.1, que muestra un sistema cerrado con un flujo de calor y una interacción de trabajo por desplazamiento de sus fronteras entre él y el ambiente de referencia. Mientras tiene lugar la interacción, ocurre una salida de trabajo (útil) hacia el entorno. La presión (P_o) y la temperatura (T_o) del ambiente de referencia son uniformes y permanecen constantes mientras tiene lugar el proceso.

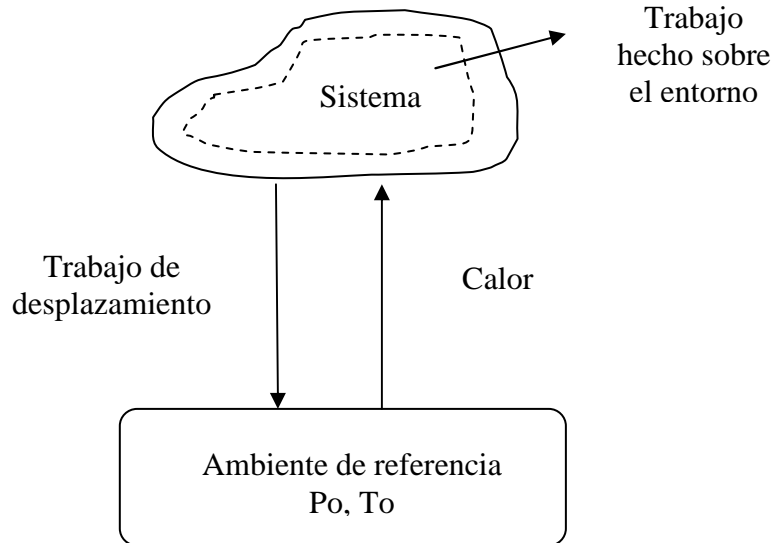


Figura 3.1 Producción de trabajo por un sistema cerrado que interactúa con un ambiente de referencia.

La definición de “**exergía**” se obtiene a partir de la primera y segunda leyes de la termodinámica descritas con anterioridad, de las cuales la primera hace referencia a la conservación de la energía, y la segunda trata sobre la calidad de la energía. Se han utilizado como sinónimos los análisis exérgicos, y “análisis de la disponibilidad termodinámica”.

Con frecuencia escuchamos comentarios sobre “la escasez de la energía”, pero ese es un término erróneo. Como ya se analizó, la energía se conserva, y tales comentarios se refieren en realidad, a la exergía o energía útil que es una medida de la capacidad para producir un cambio.

La porción complementaria de la energía que no es útil para efectuar un trabajo se denomina anergía, es decir que, en todo proceso real la energía permanece constante y la exergía se transforma en anergía [43]:

$$\text{Energía} = \text{Exergía} + \text{Anergía} \dots \dots \dots \text{ec. 3.14}$$

Hernández [44] expone un ejemplo para explicar el concepto de la siguiente manera: imagínese la compra de una manzana roja en el supermercado considerando que se encuentra en buen estado porque posee un color rojo intenso; sin embargo, al momento de consumirla se observa que una porción de la fruta está podrida en la parte interna, en consecuencia se desecha dicha porción con el propósito de comer sólo la parte en buen estado. Esta es la manera de cómo la exergía (lo que se come) y la anergía (lo que no es útil) forman parte de la energía por lo que de esta manera es como se manifiesta en cualquier sistema.

El surgimiento del análisis de exergía en asuntos relacionados con el agotamiento de los recursos naturales fue propuesto por la *Internacional Federation of Institutes for Advanced Study* en el Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions en 1974 [45].

El ambiente de referencia desde el punto de vista de exergía representa un gran cuerpo o medio en el estado de equilibrio termodinámico perfecto. En este ambiente conceptual no existen gradientes o diferencias de presión, temperatura, potencial químico, energía cinética o potencial, por lo tanto, no hay posibilidad de producir trabajo a partir de alguna forma de interacción entre las partes del ambiente. Cualquier sistema fuera del ambiente con uno o más parámetros como presión, temperatura o potencial químico el cual difiere de los parámetros correspondientes al ambiente tiene un trabajo potencial en relación con el ambiente. El ambiente es, por consiguiente, un medio de referencia natural para evaluar ese trabajo potencial en diferentes clases de sistemas. La importancia del ambiente de referencia radica en el hecho de que en los estudios exergéticos de un proceso, es necesario conocer los valores de exergía de los flujos que intervienen, mismos que a su vez dependen de las condiciones de dicho ambiente de referencia [34].

En términos prácticos, el concepto de ambiente desde la perspectiva de exergía consiste en la atmósfera, mares y océanos y la superficie terrestre. Las interacciones de este ambiente con otros sistemas son de tres tipos [45]:

- a) A través de interacción térmica: la enorme capacidad calorífica del ambiente es capaz de intercambiar calor con cualquier sistema creado por el hombre sin sufrir un cambio significativo en su temperatura.
- b) A través de interacción mecánica: esta forma de interacción ocurre sólo en sistemas en los cuales se lleva a cabo un cambio en volumen durante el proceso bajo consideración.
- c) A través de interacción química: ocurre cuando en un sistema abierto los productos de una reacción son sustancias que forman parte del medio ambiente en el cual se encuentran en equilibrio químico entre sí.

Ahrendts calculó la composición que tendría el aire atmosférico en un equilibrio termodinámico, considerando al ambiente como un sistema cerrado con una temperatura y presión dada asumiendo varios espesores de la capa externa de la litósfera a 1m, 10m, 100m, y 1000m considerando 17 elementos químicos y 692 de sus compuestos; asimismo, tomó en cuenta la masa total de cada elemento. Los valores calculados de composición en el equilibrio son muy diferentes respecto a aquellos valores medidos en campo [46]. Los resultados obtenidos por Ahrents se muestran en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Composición del aire atmosférico en equilibrio termodinámico a $T_0=298^\circ\text{K}$, $P_0=77\text{kPa}$.	
<i>Componente</i>	<i>Fracción molar</i>
N ₂	0.9451
H ₂ O	0.0397
Ar	0.0117
CO ₂	0.0033
O ₂	0.0002

Fuente: Szargut, 2005

Es importante señalar que la diferencia entre la composición real del aire atmosférico y la calculada por Ahrendts se debe a que el medio ambiente se encuentra lejos de un equilibrio termodinámico, ya que entre otras cosas, la radiación solar no sólo representa un flujo de energía, sino además, un flujo de entropía [46].

Szargut proporciona una de las definiciones más completas sobre exergía de la siguiente manera [47]:

La exergía es la cantidad de trabajo disponible cuando alguna cantidad de materia es llevada al estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes de los alrededores del medio ambiente por medio de procesos reversibles, implicando interacciones sólo con los componentes de la naturaleza.

Por su parte, en el trabajo realizado por Rivero [48] se exponen varias definiciones más de exergía entre las que se mencionan las siguientes:

- La exergía de un sistema es la energía neta (útil) que puede ser obtenida del conjunto sistema-medio ambiente al llevar a este conjunto al equilibrio.
- La exergía de un sistema es la porción de la energía que, en un medio ambiente dado, puede ser transformado en otras formas de energía noble.
- La exergía de un sistema es la capacidad de éste para producir un cambio, para hacer que un proceso se efectúe.
- La exergía de un sistema es la medida de la calidad de la energía contenida en el mismo.
- La exergía de un sistema es el potencial de trabajo máximo del sistema con respecto a sus alrededores.
- La exergía de un sistema es la medida del alejamiento del sistema con respecto al medio ambiente.

Es decir, que independiente de la redacción, la esencia de la exergía radica en el hecho de que se trata de una propiedad termodinámica extensiva propuesta para exponer las características del uso de la energía.

3.6.1 Clasificación de Exergía

La exergía de una corriente de materia puede ser dividida en distintos componentes. En ausencia de efectos nucleares, magnetismo, electricidad y tensión superficial la exergía es igual a:

$$e = e_k + e_p + e_{ph} + e_{ch} \dots \dots \dots ec. 3.15$$

Donde:

e_k : exergía cinética, e_p : exergía potencial, e_{ph} : exergía física y e_{ch} : exergía química.

La exergía cinética es debida a la diferencia de velocidad de la materia con respecto a la velocidad del ambiente, es decir:

$$e_k = m \left(\frac{v^2 - v_0^2}{2} \right) \dots \dots \dots ec. 3.16$$

La exergía potencial está relacionada con la exergía de una corriente de materia que se encuentra en una posición diferente de la de referencia y está dada por la expresión:

$$e_p = g(z - z_0) \dots \dots \dots ec. 3.17$$

En el análisis de procesos, la exergía cinética y potencial se consideran despreciables respecto a las exergías física y química.

La exergía física es el trabajo obtenible tomando la sustancia a través de un proceso reversible desde su temperatura inicial de estado T y presión P al estado determinado por la temperatura T_0 y la presión P_0 del entorno. A concentración constante, la exergía física puede calcularse como:

$$e_{ph} = |(H - H_0) - T_0(S - S_0)|_{xcte} \dots \dots \dots ec. 3.18$$

donde H es la entalpía y S la entropía. A su vez la exergía física puede dividirse en una componente térmica y en otra de presión, también llamada la componente mecánica.

Utilizando las leyes del gas ideal y suponiendo una capacidad calorífica isobárica específica constante c_p , entonces:

$$e_{ph} = Cp \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} + RT \ln \frac{P}{P_0} \right] \dots \dots \dots ec. 3.19$$

Para sólidos y líquidos se puede obtener la siguiente ecuación, suponiendo un calor específico constante (c):

$$e_{ph} = c \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - v_m (P - P_0) \right] \dots \dots \dots ec. 3.20$$

donde v_m es el volumen específico, determinado a una temperatura T_0 .

Uno de los modelos para el cálculo de exergía de elementos cuyas sustancias de referencia se encuentran disueltas en la hidrósfera es [43]:

$$e = -j \Delta G_{fi}^0 + \frac{1}{2} j z_i e_{H2} - j \sum_y b_y e_y - 2.303 RT j z_i (pH) - j RT \ln(m_i \gamma_i) \dots ec. 3.21$$

Donde b_y es el número de átomos del elemento “y” en una molécula de la especie de referencia en el agua de mar, “j” es el número de iones de referencia derivados de una molécula del elemento bajo consideración, z_i es la carga eléctrica del ión de referencia, m_i es la concentración molal [mol/Kg. H₂O], y γ_i el coeficiente de actividad.

Por otra parte, la exergía de los elementos cuyas sustancias de referencia se encuentran en la litósfera se obtiene mediante [43]:

$$e = -RT \ln x_i \dots \dots \dots ec. 322$$

Donde:

$$x_i = \frac{1}{l_i} n_{0el} c_i M_0 \dots \dots \dots ec. 3.23$$

l_i es el número de átomos del elemento en la molécula de referencia “i” presente en la litósfera, n_{0el} concentración molar media en la capa externa de la corteza terrestre, c_i fracción del elemento en la especie de referencia y M_0 la masa molecular de la especie de referencia en la capa externa de la corteza terrestre.

La exergía química es igual a la *cantidad máxima de trabajo que puede obtenerse cuando la sustancia bajo consideración es traída del estado correspondiente al entorno y que está definida por los parámetros T_0 y P_0 al estado de referencia por un proceso que involucra transferencia de calor e intercambio de sustancias solamente con el ambiente*. La exergía química está compuesta de exergía reaccional y exergía concentracional. La primera es el resultado de hacer reaccionar la sustancia de interés con otras que existen en el estado de referencia, para producir únicamente sustancias que existen en tal estado. La exergía concentracional es la diferencia de la concentración que tienen las sustancias estables producidas y la concentración que tienen tales sustancias en el estado de referencia.

La exergía química expresa el contenido de energía de una sustancia a temperatura y presión de referencia, en relación a los componentes aparecidos comúnmente en el ambiente. Algunos autores argumentan, por lo tanto, que esta exergía debe ser calculada a

partir del nivel de equilibrio ambiental. Lo anterior facilitaría el cálculo de la exergía química debido a que el estado de todos los componentes en un equilibrio ambiental podría ser un nivel de referencia. Sin embargo, vale la pena subrayar que el estado del ambiente natural está lejos del equilibrio termodinámico y la obtención del estado muerto es imposible ya que se debe representar tanto el flujo de energía como el flujo de entropía [46].

Meester y Dewulf representan mediante el esquema 3.2 el proceso para el cálculo de exergía química [49]:

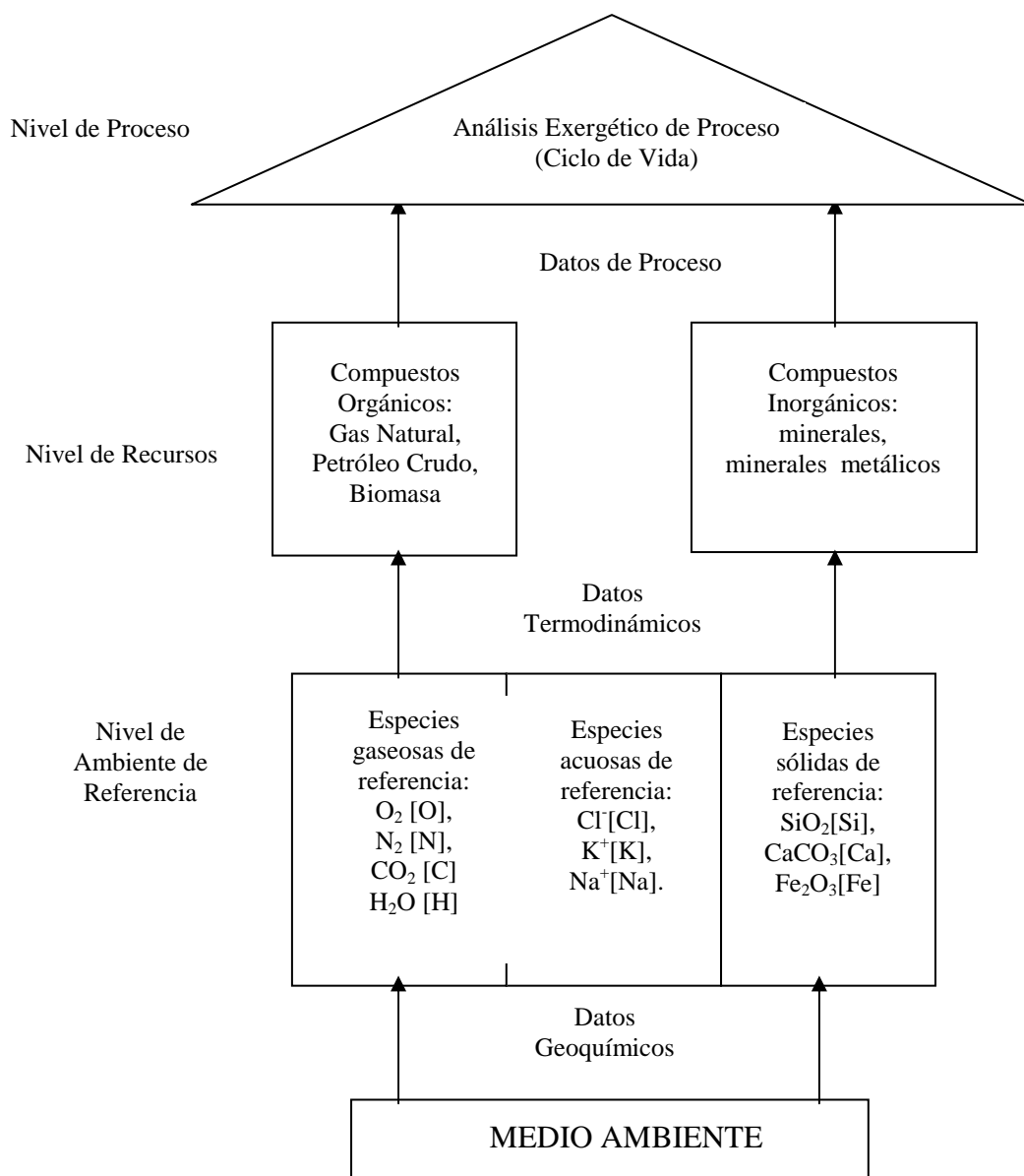


Figura 3.2 Esquema de cálculo de exergías químicas con enfoque en análisis de ciclo de vida de procesos.

Para la mayoría de los recursos naturales, la exergía química es la que refleja la mayor contribución de su valor exergético. La figura anterior enlista algunos ejemplos de las sustancias de referencia utilizadas para el cálculo de exergía química, es decir, O_2 para O, $Cl^-_{(ac)}$ para Cl o SiO_2 para Si; dichas sustancias constituyen los productos más probables de interacción con cada uno de los elementos y con los cuales muestran además alta estabilidad química. A su vez, el valor de exergía los compuestos de referencia se encuentran regidos por datos geoquímicos de acuerdo a su incidencia relativa en la naturaleza [49].

Generalmente la evaluación de la exergía química se realiza mediante la exergía química estándar, la cual se encuentra referida a condiciones de presión atmosférica de 1 atm., y temperatura ambiente de 298.15K.

A continuación se ilustran la clasificación de la exergía en la cual se muestran los diferentes términos que la conforman, así como las condiciones de las que parte su cálculo hasta llegar a las condiciones del estado muerto o medio ambiente (Figura 3.3):

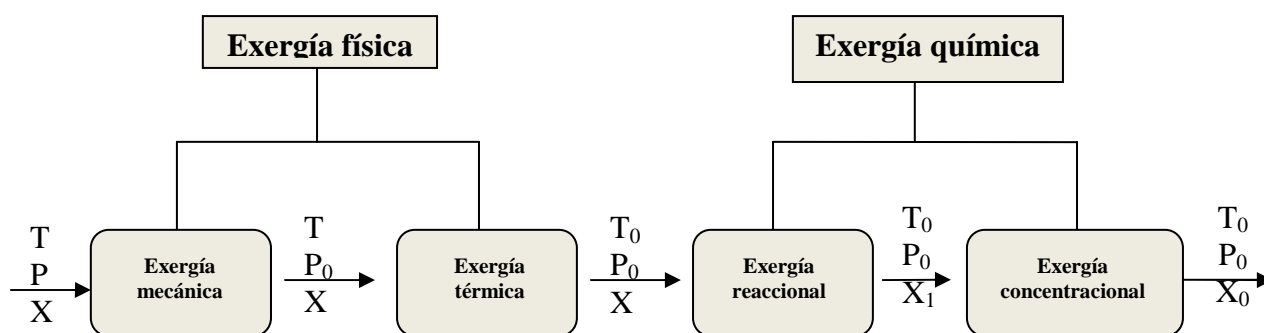
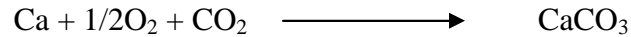


Figura 3.3 Clasificación de exergía.

A fin de calcular la exergía química Szargut introduce el concepto de especies de referencia. En las reacciones químicas sólo el número de átomos de cada elemento permanece constante, por lo tanto, en una reacción química deben ser consideradas las especies de referencia que contengan al elemento bajo estudio; cabe señalar que las especies de referencia de un elemento en particular son independientes, por lo que es posible formular una reacción química que comprenda sólo especies de referencia para que no exista el problema de equilibrio químico. Una vez seleccionadas las especies de referencia puede ser formulada una reacción de referencia para todos los compuestos. A continuación se describe un ejemplo de formulación de reacción de referencia [46].

Enseguida se describen algunos ejemplos de cálculo de exergía:

Ejemplo 3.1: Se han seleccionado las siguientes especies de referencia: CO₂ para el elemento Carbono, O₂ para el elemento Oxígeno, y CaCO₃ para el elemento Ca. La reacción de referencia para el elemento Ca tiene la siguiente forma:



Las especies de referencia O₂ y CO₂ aparecen como afluentes y CaCO₃ como efluente. La temperatura y presión ambiente no son constantes, usualmente los cambios de estos parámetros tienen influencia aunque no en gran medida para el caso de la exergía química. Por otra parte, la composición química del ambiente natural presenta variabilidad de un lugar a otro dificultando con ello el cálculo de la exergía química para lo cual se ha introducido el concepto de exergía química estándar que es calculada a una temperatura de 25°C y 1atm con una concentración estándar convencional de las especies de referencia en el ambiente, la cual se obtiene a partir de la composición media del aire atmosférico, agua de mar y de la capa externa de la corteza terrestre.

La exergía química estándar de un compuesto químico o elemento puede ser calculada por medio del balance de exergía de una reacción estándar de referencia reversible. Los reactantes que participan en una reacción química estándar aparecen por separado en estado estándar el cual se denota a una temperatura estándar:

$$e_{ch,el}^o = -\Delta_r G^o + \sum_k e_{ch}^o - \sum_j e_{ch}^o \dots \dots \dots ec. 3.24$$

donde:

$e_{ch,el}^o$: exergía química estándar del elemento considerado.

$\Delta_r G^o$: energía libre de Gibbs de la reacción de referencia.

$\sum_k e_{ch}^o$, $\sum_j e_{ch}^o$: exergías químicas estándar del elemento como efluente y afluente, respectivamente.

Ejemplo 3.2: Cálculo de exergía química estándar de un elemento.

La energía libre estándar de la reacción de referencia del ejemplo anterior es $\Delta G^o = -738.6 \text{ kJ/mol}$ CaCO₃, los valores estándar de exergía química son CaCO₃=16.3KJ/mol, CO₂=19.87KJ/mol y O₂=3.97KJ/mol. de acuerdo a la ecuación 3.15 La exergía química estándar del elemento Ca es:

$$e_{ch,ca}^o = 738.6 + (16.3 - 19.87 - (1.5 * 3.97)) = 729.1 \text{ kJ/mol}$$

La formulación de la reacción de referencia y la aplicación de la ecuación 3.21 son sólo utilizadas para elementos químicos. Después del cálculo de la exergía química estándar de los elementos químicos, la exergía química normal de todos los compuestos químicos

puede ser calculada por medio de un balance de exergía de una reacción reversible de formación del compuesto considerado:

$$e_{chcomp}^o = -\Delta_f G^o + \sum_{el} n_{el} e_{ch,el}^o \dots \dots ec. 3.25$$

donde:

$e_{ch,el}^o$: exergía química estándar del elemento, e_{chcomp}^o : exergía química estándar del compuesto, n_{el} : número de moles del elemento por unidad de compuesto, $\Delta_f G^o$: energía libre de Gibbs de formación del compuesto.

Ejemplo 3.3: Cálculo de exergía química estándar de un compuesto químico.

La energía libre de formación del compuesto SO_3 es 366.5kJ/mol. Las exergías estándar de los elementos son: S=609.6KJ/mol, O_2 =3.97KJ/mol. De acuerdo a la ecuación 3.16 , la exergía química del compuesto es:

$$e_{chcomp}^o = -366.5 + 609.6 + (1.5 * 3.97) = 249.1kJ/mol$$

Para el cálculo de la exergía química de gases de referencia, los que en conjunto forman la atmósfera, el trabajo por tener a los componentes a la presión estándar desde la presión parcial del estado de referencia, debe determinarse. Esto puede efectuarse mediante:

$$e_{ch} = RT_0 \ln \left(\frac{P_0}{P_\infty} \right) \dots \dots \dots ec. 3.26$$

donde P_∞ es la presión parcial del componente en el estado de referencia.

Para componentes puros la exergía química puede determinarse por:

$$e_{ch} = -\Delta G_0 - \sum_i x_i e_{ch,i}^{entrada} - \sum_i x_i e_{ch,i}^{salida} \dots \dots \dots ec. 3.27$$

donde ΔG_0 es la función de energía libre de formación de Gibbs. Ésta puede calcularse a partir de la relación:

$$\Delta G_0 = \sum_{prod} v_k \Delta g_k - \sum_{react} v_j \Delta g_j \dots \dots \dots ec. 3.28$$

donde los términos que preceden el signo de sumatoria son, respectivamente, los coeficientes y las funciones molares de formación de Gibbs; “j” es el co-reactante y “k” es el producto.

La exergía química para mezclas puede calcularse como:

$$e_{ch,mez} = \sum_i x_i e_{ch,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln \gamma_i x_i \dots \dots ec. 3.29$$

donde x_i es la fracción mol del componente "i", R la constante de los gases y γ es el coeficiente de actividad. Es sabido que para soluciones ideales este coeficiente es igual a uno.

3.6.2 Exergía química de combustibles

El procedimiento a continuación descrito es utilizado como parte de la metodología de este trabajo, por lo que será retomado en dicho capítulo. La referencia de la siguiente información corresponde a Hernández Santoyo [44]:

Para muchos combustibles su estructura química es desconocida. Para solucionar este problema la exergía química se estima de acuerdo a su poder calorífico neto (PCN). La relación entre PCN y la exergía química se encuentra definido por:

$$e_{ch} = \varphi PCN \dots \dots ec. 3.30$$

donde:

e_{ch} : exergía química estándar del combustible.

φ : factor de proporcionalidad que puede calcularse con fórmulas basadas en la composición (fracción masa). Para diferentes combustibles éste valor fluctúa entre 1.04 y 1.08.

PCN: Poder Calorífico Neto.

El factor de proporcionalidad es calculado mediante:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C} \right) + 0.0428 \frac{N}{C} \dots ec. 3.31$$

donde:

φ : factor de proporcionalidad.

C, H, O, N, S: fracción masa de los elementos Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre, respectivamente.

A su vez, el poder calorífico neto se obtiene a partir de:

$$PCN = 34.8C + 93.8H + 10.46S + 6.28N - 10.8O [MJ/Kg] \dots ec. 3.32$$

donde:

PCN: Poder Calorífico Neto.

C, H, O, N, S: fracción masa de los elementos Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre, respectivamente.

3.6.3 Características de la exergía

A continuación se enlistan las principales características del concepto de exergía [33]:

- 1) Un sistema en completo equilibrio con su ambiente no posee exergía. No aparece ninguna diferencia en temperatura, presión o composición, por lo tanto, no existe una fuerza motriz para cualquier proceso.
- 2) La exergía de un sistema se incrementa cuanto más se desvía desde su entorno. Por ejemplo, una cantidad especificada de agua caliente tiene un contenido de exergía más alto durante el invierno que en un día soleado de verano; y de la misma manera, un bloque de hielo posee poca exergía en invierno mientras que puede tener una exergía significativa en verano.
- 3) Cuando la energía pierde su calidad, la exergía es destruida. La exergía es la parte de la energía que es útil, por lo tanto tiene valor económico y vale la pena gestionarla cuidadosamente.
- 4) La exergía por definición depende no sólo del estado o flujo de un sistema, sino también del estado del medio ambiente.
- 5) Las eficiencias de exergía representan una medida para abordar la idealidad (o reversibilidad), lo cual no es necesariamente cierto para el caso de las eficiencias energéticas.
- 6) Generalmente la exergía es considerada como un recurso valioso ya que tanto para recursos energéticos como no energéticos, la exergía es una medida para ambos.
- 7) Las formas de energía con elevados contenidos de exergía son más valiosos y útiles que las formas de energía con bajo contenido de exergía. El calor residual de los combustibles fósiles a condiciones cercanas a las ambientales, por ejemplo, posee un bajo contenido de exergía a pesar de que puede tener un alto contenido energético, y por lo tanto su valor resulta limitado.
- 8) Un depósito de mineral concentrado “contrasta” con el ambiente, y por lo tanto, tiene exergía. Este contraste y exergía incrementan con la concentración del mineral. Cuando el mineral es explotado, el contenido de exergía del mineral es retenido y si se somete a un proceso de enriquecimiento o purificación, el contenido de exergía aumenta.

En términos exergéticos, la irreversibilidad, también llamada pérdida o destrucción de exergía, se calcula realizando un balance y tomando la diferencia entre todos los flujos de exergía entrantes y todos los flujos de exergía salientes, es decir:

$$I = \sum_{\text{entradas}} e_i - \sum_{\text{salidas}} e_j \dots \dots \dots ec. 3.33$$

Otra forma de calcular la irreversibilidad está dada por la ecuación de Gouy-Stodola, en donde el incremento de entropía se multiplica por la temperatura del ambiente de referencia de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I = T_0 \left[\sum_{salidas} S_j - \sum_{entradas} S_i \right] = T_0 \Delta S \dots \dots ec. 3.34$$

3.7 Análisis de Exergía

El método de exergía es una técnica relativamente nueva, como ya se mencionó anteriormente, como una medida universal del trabajo potencial o calidad de las distintas formas de energía en relación con un ambiente dado. Un balance de exergía aplicado a un proceso o a una planta completa nos dice la cantidad de trabajo potencial o exergía que presenta un proceso a la entrada bajo la consideración de que ésta ha de ser consumida, o irremediamente perdida por el mismo proceso. La pérdida de exergía, o irreversibilidad, proporciona una medida cuantitativa de la ineficiencia de un proceso.

Específicamente el análisis de exergía representa un método y herramienta efectivo para [34]:

- 1) Combinación y aplicación de los principios de conservación de materia y energía para el diseño y análisis de sistemas de energía.
- 2) Mejoramiento de eficiencia energética.
- 3) Revelar si es posible o no un diseño más eficiente de sistemas a través de la reducción de ineficiencias en los sistemas existentes.
- 4) Abordar el impacto en el ambiente así como la reducción y/o mitigación del mismo.
- 5) Identificar si los sistemas existentes contribuyen o no al logro de un Desarrollo Sustentable.

Para complementar el concepto de exergía y con ello la importancia de su análisis y gestión se presenta la tabla 3.2 de comparación entre Energía y Exergía [33]:

Tabla 3.2 Comparación entre los términos Energía y Exergía.	
<i>Energía</i>	<i>Exergía</i>
Depende sólo de las propiedades de la materia o flujo de energía y es independiente de las propiedades del medio ambiente.	Depende tanto de las propiedades de materia o flujo de energía así como de las propiedades del ambiente.
Tiene valores diferentes a cero cuando se encuentra en equilibrio con el ambiente.	Igual a cero cuando se encuentra en el estado muerto en virtud de que existe un equilibrio completo con el medio ambiente.
No puede ser destruida ni producida.	No puede ser destruida ni producida en un proceso reversible, pero siempre es destruida o consumida en un proceso irreversible.
Aparece en muchas formas (cinética, potencial, flujos de trabajo y calor), y es medida en esa forma.	Aparece en muchas formas (cinética, potencial, trabajo, térmica), y es medida en base al trabajo o habilidad para producir trabajo.
Es una medida sólo de cantidad.	Es una medida de cantidad y calidad.

Un procedimiento recomendado para el análisis de energía y exergía es [33]:

1. Dividir el proceso en tantas secciones como sean deseadas dependiendo de la profundidad de detalle requerido de análisis.
2. Realizar los balances de materia y energía convencionales y determinar todas las cantidades básicas (trabajo, calor) y propiedades (temperatura y presión).
3. Basados en la naturaleza del proceso y en la profundidad del análisis seleccionar un modelo de referencia ambiental.
4. Evaluar los valores de energía y exergía relativos al modelo de referencia ambiental.
5. Realizar los balances de exergía, incluyendo la determinación de consumo de exergía.
6. Seleccionar la definición de eficiencia y evaluar los valores de ésta.
7. Interpretar resultados, obtener conclusiones y recomendaciones relativas a cuestiones de cambios de diseño y/o modificaciones.

3.7.1 Rendimiento Exergético

Desde el punto de vista de la segunda ley de la Termodinámica, la entropía y la exergía son propiedades no conservativas que, en presencia de irreversibilidades, la entropía se genera y la exergía se destruye. Por tanto, el rendimiento exergético mide la pérdida de exergía durante un proceso, entendiendo a las pérdidas de exergía como transferencias no útiles a través de la frontera. Asimismo esta ley recalca el hecho de que dos formas de la misma cantidad de energía pueden tener exergías muy diferentes; por lo que la energía está ponderada según su exergía. A diferencia del rendimiento térmico, el rendimiento exergético tiene en cuenta las pérdidas de capacidad de trabajo durante un proceso [40].

Una definición general de rendimiento exergético según la segunda ley, η , para un proceso se puede definir como [42]:

$$\eta = \frac{\textit{producción de exergía}}{\textit{entrada de exergía}} * 100\% \dots \dots \dots 3.35$$

Está claro que η es siempre menor que 100%; sólo puede alcanzar el 100% cuando todos los procesos implícitos son reversibles. De esta manera η nos permite establecer una comparación realista entre lo que se logra en una situación real y lo mejor que podría alcanzarse cuando un sistema cambia de un estado dado a cualquier otro.

3.7.2 Cálculo de eficiencia exergética

Cornelissen [50] describe tres tipos de eficiencias exergéticas para los procesos en un estado estable en sistemas abiertos. La primera definición consiste en la relación del flujo de exergía saliente respecto del flujo de exergía entrante; la segunda eficiencia llamada racional es la relación descrita anteriormente entre la exergía deseada a la salida del sistema respecto a la exergía usada; y la última definición consiste en la relación del flujo de

exergía a la salida menos los componentes no transformados de exergía respecto al flujo total de exergía entrante menos los componentes de la exergía no transformados. El cálculo de estos tipos de eficiencias se proporciona a continuación:

a) *Eficiencia Simple*: la forma más simple de eficiencia es:

$$e_{\text{entrada}} = e_{\text{salida}} + I_{\text{rr}},$$

donde “Irr” es irreversibilidad.

Esta eficiencia es la razón del flujo total de exergía a la salida y el flujo total de exergía a la entrada, es decir:

$$\eta = \frac{e_{\text{salida}}}{e_{\text{entrada}}} \dots \dots \dots ec. 3.36$$

Esta definición puede usarse para procesos, unidades de procesos, equipos, etc., aunque proporciona una impresión falsa del comportamiento termodinámico del sistema y parece válida solamente cuando todos los componentes del flujo de entrada exergético de un proceso se transforman en otros componentes.

b) *Eficiencia Racional*: la relación entre la exergía deseada a la salida del sistema y la exergía usada fue definida por Kotas y Tsatsaronis en 1995 y es la siguiente:

$$\psi = \frac{e_{\text{deseada}}}{e_{\text{usada}}} \dots \dots \dots ec. 3.37$$

La exergía deseada a la salida del sistema es la suma de todas las transferencias de exergía del sistema y debe ser observada como la salida deseada, más cualquier producto secundario, co-producto que sea producido por el sistema; la salida deseada se determina examinando la función del sistema. La exergía usada es el insumo requerido en exergía para que el proceso pueda llevarse a cabo. Si ambas exergías se identifican correctamente en relación a una superficie de control, la que encierra todas las irreversibilidades relacionadas con el proceso considerado, entonces, juntas, deben considerar todas las transferencias de exergía. En otras palabras, no puede existir ningún término de transferencia en los balances de exergía que no pueda ser incluido en cualquiera de los dos términos, ya que si los hubiera, resultarían en irreversibilidades externas, las cuales se excluyen a priori. Por lo tanto:

$$e_{\text{usada}} = e_{\text{deseada como salida}} + I \dots \dots \dots ec. 3.38$$

Utilizando las dos ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación para la eficiencia racional de la siguiente manera:

$$\Psi = 1 - \frac{I}{e_{usada}} \dots \dots \dots ec. 3.39$$

La eficiencia racional puede ser aplicada a cualquier sistema excepto para aquellos que solamente disipan energía ya que ningún producto deseado puede definirse en este caso.

- c) *Eficiencia con tránsito de exergía*: esta eficiencia fue introducida por Kostenko y desarrollada por Brodyansky, Sorin y Le Goff en 1994 mejorando la definición de la eficiencia simple ya que substraer los componentes no transformados de las entradas y salidas de las corrientes del sistema, expresándose como:

$$\eta = \frac{e_{salida} - e_{tránsito}}{e_{entrada} - e_{tránsito}} \dots \dots \dots ec. 3.40$$

La exergía en tránsito, según Sorin, puede considerarse como parte de la exergía que atraviesa el sistema sin tomar parte de los cambios físicos o químicos del sistema, por lo que esta exergía no debería afectar la eficiencia del proceso y debe substraerse de los flujos de entrada y salida antes de calcularse.

La eficiencia simple tiende a proporcionar la más alta eficiencia comparada con las otras dos. La eficiencia racional es fácil de aplicar y proporciona un buen detalle del proceso; para definir la salida deseada y la exergía utilizada en el caso de un equipo o unidad, es necesario tener muy clara la función de dicha unidad o equipo dentro del proceso. La eficiencia con tránsito de exergía es un método directo para una apropiada definición de eficiencia, aunque los cálculos son más complejos. La diferencia entre la eficiencia con tránsito de exergía y la eficiencia racional es el cálculo de los cambios de exergía de las corrientes causada por diferencias en temperatura y presión; para el caso de la eficiencia racional, los cambios se calculan sustrayendo las componentes térmicas y de presión de la exergía de las corrientes bajo consideración; mientras que para el caso de la eficiencia con exergías en tránsito, los cálculos se efectúan sustrayendo la exergía de las corrientes en la condición que cambie (cambios de presión o de temperatura).

3.8 Relación entre exergía, medio ambiente y desarrollo sustentable

La relación entre energía y economía fue uno de los temas de mayor preocupación en la década de los setenta debido principalmente a impactos ambientales como lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono y cambio climático. La relación entre desarrollo sustentable y el uso de recursos, particularmente recursos energéticos es de gran significado en la sociedad actual. El logro de un desarrollo sustentable implica también la sustentabilidad de los recursos energéticos [33].

A continuación se analizarán cada una de las interrelaciones existentes entre el concepto de exergía y Desarrollo Sustentable:

Sustentabilidad Ambiental:

Como se ha venido tratando en este trabajo, el análisis de exergía es, ante todo, una herramienta primordial para el mejoramiento en la eficiencia de procesos y sistemas, lo cual conduce a una disminución en la extracción de recursos energéticos del ambiente como son los combustibles fósiles, que a su vez implica directamente una menor emisión de contaminantes, por lo que, problemas como la contaminación atmosférica, descargas de residuos a cuerpos acuíferos y disposición de grandes volúmenes de residuos sólidos son en cierta medida mitigados cuando los métodos exergéticos son utilizados para el incremento de eficiencia. Desde una perspectiva más ambiental, Rosen ejemplifica el vínculo entre exergía y medio ambiente (cada vez más importante que la relación entre energía y medio ambiente) argumentando que el planeta debe ser visto como un gran “cuerpo ordenado” representado por la plantas y animales en abundancia así como aire, agua y suelo limpios, por lo que un incremento en desorden o creación del caos asociados con contaminantes dispersados al ambiente provoca la pérdida de organización en los sistemas de vida [51].

Como una medida para restituir las condiciones ambientales degradadas a causa de la destrucción de exergía, Gordon Reistad sugiere en 1970 la creación de una categoría en la contaminación atmosférica en la cual fuera estimado el costo de la contaminación atmosférica producida por combustible ya sea como el costo para eliminar el contaminante o el costo a la sociedad.

Las investigaciones aún no arrojan información sobre la destrucción de qué tipo de exergía en particular es la más perjudicial para el medio ambiente ya que existen divergencias en que la realización de este propósito se lleve a cabo solamente a los propios valores; sin embargo, algunos expertos sugieren que la exergía química es potencialmente significativa para efectos de impacto ambiental [53].

Esta preocupación mundial por frenar la depreciación de los recursos naturales y la contaminación industrial ha obligado a crear modelos e instrumentos de política económica para otorgarle precio a la contaminación del aire, a los genes de seres vivos en peligro de extinción, a la contaminación de los cursos de agua, a la erosión del suelo, etc. así como a establecer mecanismos de contabilidad que permitan incorporar a las cuentas nacionales las llamadas “cuentas patrimoniales”, que no son otra cosa que ponerle precio a lo que en la práctica no tiene [41].

Sustentabilidad Económica:

El análisis de la economía ecológica parte de los flujos de energía y comenzó a tener presencia a partir de trabajos como el del economista inglés Pigou que en 1920 sostuvo la necesidad de que los efectos negativos a la sustentabilidad fueran contemplados por el Estado, imponiendo a sus responsables una tasa. Posteriormente en 1960 Coase plantea que

el problema radica más en términos jurídicos que económicos ya que si los derechos de propiedad abarcaran al aire que respiramos, cada quien podría exigir una indemnización a la fábrica contaminante; pero como no existe tal alcance jurídico, la propuesta de Coase consistió en el establecimiento de negociación directa entre los causales y afectados, descartando la participación estatal. En ambas propuestas, el mercado continuaría siendo el mecanismo de asignación de recursos. Por otra parte, no se debe perder de vista que los ritmos naturales de la biosfera no tienen ninguna relación con los ritmos económicos, el imponer precio a la contaminación no garantiza, en absoluto, la sustentabilidad de los recursos [51], es decir, no existe precio que mida un ritmo de entropía. Una posible solución a este panorama es la aplicación del concepto “capacidad de carga” que nos dice que para una población determinada existe un volumen y calidad necesaria de recursos, y así, si la producción sobrepasa la capacidad natural de sustentación (reproducción) de dichos recursos, entran en crisis los procesos naturales de los mismos.

Con la finalidad de cuantificar económicamente la sustentabilidad desde la perspectiva exergética, se han desarrollado varios métodos para análisis económicos basados en exergías, mismos que han sido aplicados con diversos grados de éxito. Entre éstos se pueden mencionar el análisis exergo-económicos, termo-económicos y costos de la segunda ley.

Una característica común de éstas técnicas es que en ellos se reconoce que la exergía (no energía), representa un valor dentro de un sistema y asignan costos y/o precios a las variables relacionadas con exergía. Éstas técnicas ayudan en la determinación de asignaciones apropiadas de recursos económicos y, por lo tanto, a optimizar el diseño y operación de un sistema; lo anterior se logra maximizando la factibilidad económica y la rentabilidad de dicho sistema a través de una determinación actual de costos de productos y sus precios adecuados [52].

Sustentabilidad Tecnológica:

Como es sabido, los procesos industriales consisten en una serie de operaciones, propiamente definidas como operaciones unitarias en las cuales hasta ahora, la responsabilidad de los ingenieros y profesionales de la industria ha consistido en producir dentro de especificación los productos demandados por el mercado sin ser considerada la problemática ambiental. En otras palabras, se pensaba que no existía relación directa entre la aplicación de la tecnología para transformar materias primas, energía e innovaciones tecnológicas para evitar la contaminación ambiental en los sistemas ecológicos. No obstante, la innovación tecnológica representa el soporte del desarrollo tanto industrial como ecológico [43].

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y EXERGÍA

4.1 Historia del Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología fundamental para la definición de estrategias empresariales y gubernamentales en el contexto de la prevención de la contaminación. Su carácter sistémico permite interpretar el desempeño ambiental de una unidad analizada en forma integral.

El Análisis de Ciclo de Vida o LCA (Life Cycle Analysis) se originó a principios de los años 1970's en cuatro diferentes países, Gran Bretaña, Suiza, Suecia y la Unión Americana.

En Europa, los primeros estudios de comparación ecológica de productos fueron realizados en 1974 en Suiza. Después en 1984 la agencia suiza de Protección al Medio Ambiente publicó un boletín de ecobalance para materiales de empaque proporcionando una estructura de cálculo [54].

Uno de los países en donde se desarrollaron más casos de ACV fue Alemania, teniendo como causa principal el problema de los desechos sólidos que ha venido ubicándose como uno de los centros de atención desde principios de los años 80.

En 1994, la International Organization for Standardization (ISO), comenzó a lanzar sus series de normas 14040 sobre LCA. Hasta ahora, la utilización de estas normas ha resultado en 4 tipos.

Otros organismos encargados de la unificación de la metodología así como aplicaciones y usos del Análisis de Ciclo de Vida son: SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), y UNEP (United Nations Environment Programme) and LCI (Life Cycle Initiative).

La consolidación del Análisis del Ciclo de Vida como tema de investigación tuvo lugar en el Centrum Van Milieukunde y en Universidades como la de Leiden, la cual se convirtió en una de las instituciones líderes en la metodología de este estudio. Para el año 2006 se amplía en concepto del Análisis de Ciclo de Vida a aspectos ambientales, económicos y sociales.

El pensamiento de Ciclo de Vida en nuestro país fue antecedido por tres etapas; la primera comenzó en 1988 y se limitaba al cumplimiento de una Legislación Ambiental a través de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), el Programa de Auditoría Ambiental de la Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (PROFEPA), y del Comité Técnico de Normalización de Sistemas de Administración Ambiental; la segunda etapa referida a Sistemas de Administración Ambiental se caracterizó en 1997 por las primeras certificaciones ISO 14001 y en 1999 con Seminarios y Estudios Académicos concernientes al Análisis de Ciclo de Vida; en la tercera etapa de

Evaluación del Desempeño y responsabilidad corporativa surge el Subcomité Nacional de Análisis de Ciclo de Vida (ISO y NMX) así como la Evaluación del Desempeño Ambiental; en la última etapa conocida precisamente como Pensamiento de Ciclo de Vida se publican en 2005 las Normas Oficiales Mexicanas 14040 y 14044 consolidándose de esta manera las Aplicaciones de esta herramienta no sólo en la Industria sino que además en el sector gubernamental teniendo como propósito la obtención Productos y Procesos Sustentables.

4.2 Análisis de Ciclo de Vida. Definición y Normatividad

Este análisis considera el ciclo de vida completo de un producto, desde la extracción, generación de energía, adquisición de materias primas, producción y manufactura, uso y tratamiento o disposición final constituyendo una herramienta útil para evaluar los impactos ambientales producidos por los procesos.

Entre las definiciones del análisis ciclo de vida se pueden mencionar [55]:

- SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry): Proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los desechos enviados al ambiente; para determinar el impacto que esos desechos, y tales formas de utilizar la materia y energía producen en el ambiente; y para identificar y evaluar oportunidades para mejorar el ambiente.
- ISO 140040:2006: Compilación y Evaluación de las entradas y salidas así como los impactos ambientales de un producto o sistema a través de su ciclo de vida, entendiéndose por Ciclo de Vida a las etapas consecutivas e interrelacionadas de un producto desde la adquisición de materias primas o la generación de las mismas de los recursos naturales hasta su disposición final.

La Administración Ambiental del Análisis de Ciclo de Vida en ISO 14000 se encuentra conformada de la siguiente manera [56]:

- ISO 14040: Principios y Marco Metodológico
- ISO 14041: Definición de Objetivos y Alcance y Análisis de Inventario
- ISO 14042: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida
- ISO 14044: Requisitos y Guías
- ISO 14047: Ejemplos de Aplicación de ISO 14042
- ISO 14048: Formato de Documentación de la Información
- ISO 14049: Ejemplos de Aplicación de ISO 14041

En México las Normas referentes a esta herramienta son:

- *NMX-SAA-14040-IMNC-2008*: Gestión Ambiental- Análisis de Ciclo de Vida- Principios y Marco de Referencia.
- *NMX-SAA-14044-IMNC-2008*: Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida- Requisitos y Directrices.

Asimismo, dentro de la Legislación Mexicana el concepto de Análisis de Ciclo de Vida se encuentra presente en [57]:

- Ley Nacional de Vivienda: “Establecer mecanismos para que en la construcción de vivienda se observen las disposiciones aplicables en materia de desarrollo urbano, el ordenamiento territorial y el *desarrollo sustentable*...buscando vivienda que no contamine *en su ciclo de vida*”.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos a través del inventario de *ciclo de vida* para sistemas de manejo de residuos.
- Ley Federal de Adquisiciones: “Las adquisiciones, arrendamientos y servicios se adjudicarán... administrando con eficiencia energética, el uso responsable del agua y demás circunstancias pertinentes...”
- Ley Nacional para Biocombustibles: “La producción y uso de biocombustibles puede resultar benéfica para México siempre y cuando se asegure la aplicación de criterios de sustentabilidad que protejan los recursos naturales y permitan un rendimiento ambiental positivo a lo largo de *todo el ciclo de vida* de estas energías”.
- Ley Nacional de Turismo: “Crear y consolidar desarrollos turísticos conforme a los planes maestros de desarrollo...mediante la determinación de los mecanismos necesarios para la creación, conservación, protección y aprovechamiento de los recursos y atractivos turísticos nacionales...preservando el equilibrio ecológico”.

4.3 Metodología para el Análisis de Ciclo de Vida

Según lo dicho anteriormente, los procedimientos para la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida se encuentran uniformados en el marco de las normas ISO 14040. La importancia de la uniformidad de los procedimientos es necesaria para asegurar transparencia en la interpretación de los resultados finales. Un estudio de Análisis de Ciclo de Vida se puede hacer para diferentes niveles de profundidad: desde un escaneo global utilizando datos estándares, hasta un estudio detallado.

De acuerdo a ISO 14040, el Análisis de Ciclo de Vida consta de 4 fases [56]:

- **Definición del objetivo y alcance**
- **Análisis de inventario**
- **Análisis de impactos**
- **Análisis de mejoras**

Estas fases se encuentran ilustradas mediante la figura 4.1:

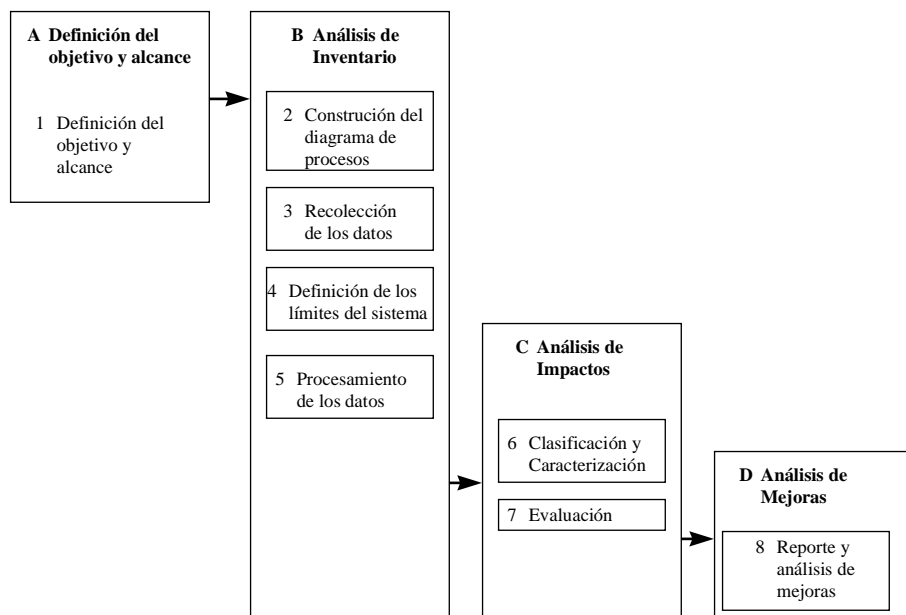


Figura 4.1 Fases en el Análisis de Ciclo de Vida según ISO 14040.

Estas etapas son de carácter dinámico y sus interrelaciones permiten reconsiderar las hipótesis planteadas o refinar los datos utilizados en alguna de las etapas, lo anterior se puede visualizar mediante el esquema 4.2 mostrado a continuación:

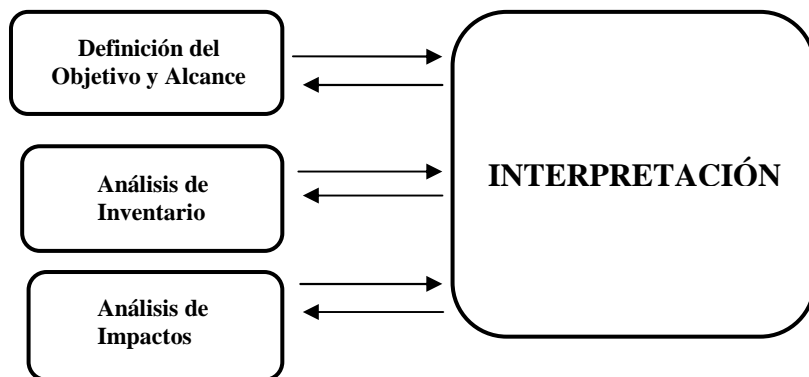


Figura 4.2 Interrelaciones entre las etapas del Análisis de Ciclo de Vida.

4.3.1 Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio involucra las razones para realizar el estudio, las intenciones de aplicación, mientras que el alcance se refiere a los límites del sistema que va a ser estudiado, la unidad funcional. Como ya se ha mencionado, el análisis de ciclo de vida es una técnica iterativa, es decir, conforme los datos son recolectados, varios aspectos del alcance pueden requerir modificación a fin de cumplir con el objetivo original del estudio.

Una vez que el objetivo y alcance están claros, se establece una base de cálculo durante el estudio llamada Unidad Funcional, la cual define la cuantificación de las funciones identificadas del producto. El objetivo principal de la unidad funcional es proporcionar una referencia a la cual las entradas y las salidas están relacionadas y se define a partir de las funciones que cumple el producto. Todos los resultados al final del estudio van estar relacionados con esta unidad funcional. En el caso de una comparación entre dos alternativas diferentes, la definición de la unidad funcional es crucial para llegar a obtener una comparación seria y confiable.

El establecimiento correcto de la Unidad Funcional está basado en el siguiente proceso:

- Identificación de las funciones del producto
- Selección de una función
- Determinación la unidad funcional
- Determinación del flujo de referencia

A fin de ejemplificar este proceso consideremos la necesidad de establecer la Unidad Funcional en el caso de la edición de 1000 revistas, cada una de las etapas se desglosan mediante la tabla 4.1:

<i>Etapas del proceso</i>	<i>Descripción</i>
1) Identificación de las funciones	Transferencia de información
	Conservación de información
2) Selección de una función	Transferencia de información
3) Determinación de la Unidad Funcional	Edición de 1000 revistas
4) Determinación del flujo de referencia	200 Kg de papel y tinta
	200 Kg de revistas

Límites del Sistema: El Análisis de Ciclo de Vida se realiza definiendo los sistemas del producto como modelos que describen los elementos clave de los sistemas físicos. Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema. Idealmente, el sistema del producto se debe modelar de tal manera que las entradas y salidas en sus límites sean flujos elementales. Sin embargo, no es necesario gastar recursos para cuantificar tales entradas y salidas que no producirán cambios significativos en las conclusiones generales del estudio.

La elección de los elementos del sistema físico a modelar depende de la definición del objetivo y el alcance del estudio, de su aplicación y público previstos, de las suposiciones realizadas, de las restricciones en cuanto a datos y costos y los criterios de corte. Los modelos utilizados deben describirse y las suposiciones que fundamentan esas elecciones deben identificarse. Los criterios de corte utilizados en un estudio deben ser claramente entendidos y descritos.

Dependiendo de la profundidad del estudio se recomienda que para establecer los límites del sistema se consideren los siguientes puntos:

- La adquisición de la materia prima.
- Entradas y salidas al proceso de manufactura principal.
- Distribución/Transporte.
- Producción y uso de combustibles, electricidad y energía.
- Uso y mantenimiento de productos.
- Recuperación de productos usados (incluyendo reuso, reciclaje y recuperación de energía).
- Manufactura de materiales básicos.
- Manufactura, mantenimiento y desmantelamiento de equipos.
- Operaciones adicionales, como alumbrado y calefacción.

Es importante señalar que los cálculos realizados en el presente trabajo no toman en consideración la Distribución de ninguno de los bloques que conforman el proceso de producción de cada uno de los materiales bajo estudio. En el capítulo correspondiente a Metodología se proporciona una descripción a detalle de la estructura y datos manejados.

La descripción de los sistemas para la construcción del análisis de ciclo de vida de los envases bajo estudio se encuentra especificada en el capítulo correspondiente a Metodología.

4.3.2 Análisis de Inventario

Esta segunda fase del Análisis de Ciclo de Vida consiste básicamente en la recolección y procesamiento de datos relacionados con la producción y uso de un producto específico mediante la aplicación de balances de materia y energía. Con este fin, durante el análisis se describe y simula el modelo particular del sistema del producto para permitir la adquisición de los datos requeridos y los cálculos subsecuentes de entrada y salida para el sistema en sí o para cualquier otro subsistema definido. El resultado del inventario de ciclo de vida es una lista completa de todos los materiales y fuentes de energía a la entrada del sistema así como los productos obtenidos, emisiones al ambiente y desechos generados. Por lo anterior en Análisis de Inventario es considerado el núcleo del Análisis del Ciclo de Vida.

De acuerdo a ISO 14040 los datos a procesar para cada unidad de proceso considerada dentro de los límites del sistema incluyen:

- a) Entradas de energía, materias primas, servicios auxiliares, otras entradas físicas.
- b) Productos, Co-productos y residuos.
- c) Emisiones atmosféricas, descargas al agua y suelo.
- d) Otros aspectos ambientales.

Para el procesamiento de los datos recolectados se debe considerar:

- a) Validación de datos.
- b) Relacionar los datos con la unidad de proceso.
- c) Relacionar los datos con el flujo de referencia de la Unidad Funcional.

Estos pasos son necesarios para generar los resultados del inventario correspondiente al sistema definido así como para cada unidad de proceso y la Unidad Funcional establecida. El cálculo de flujos de energía debe tomar en cuenta los diferentes combustibles y fuentes de electricidad usadas, la eficiencia de conversión, distribución de flujo de energía así como las entradas y salidas asociadas con la generación y uso de dicho flujo de energía.

A continuación se muestra el esquema 4.3 del Análisis de Inventario; como puede observarse, esta fase del Análisis del Ciclo de Vida involucra y procesa los datos de entrada y salida tanto de materia como de energía de un proceso específico considerando las alternativas de disposición final del producto una vez concluida la utilidad para la que fue fabricado el producto.

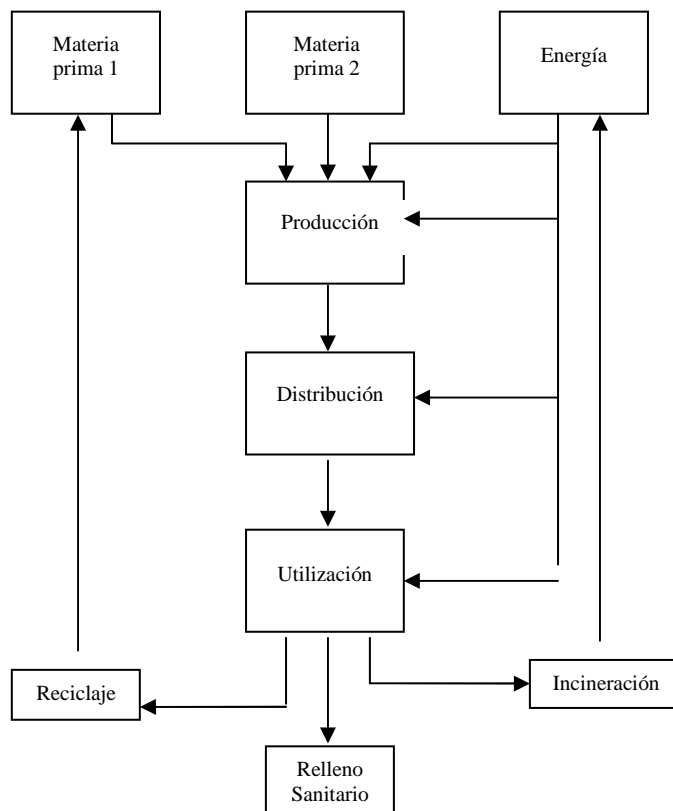


Figura 4.3 Esquema de análisis de inventario.

4.3.3 Análisis de Impactos

El Análisis de Impactos o Evaluación de Impactos tiene como propósito la “traducción” de los diferentes impactos como son las emisiones, materias primas y energías calculadas en el Análisis de Inventario y con ello evaluar la importancia de potenciales impactos ambientales.

La interpretación de los impactos ambientales requiere de la clasificación de los problemas para obtener una unidad de expresión de los impactos; no obstante, las clasificaciones que se hacen están limitadas debido a que la crisis ambiental está conformada por los distintos problemas que a su vez se encuentran interrelacionados entre sí.

Conforme a la norma ISO 14040 esta fase puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y alcance del estudio para determinar si dichos objetivos han sido cumplidos, o bien, para modificarlos en caso de que los datos utilizados y disponibles no permitan alcanzarlos en su totalidad.

La evaluación de Impactos aborda sólo aquellas cuestiones planteadas en el objetivo y alcance; por lo tanto, esta fase no constituye una valoración completa de todos los rubros ambientales relacionados con el sistema del producto bajo estudio. Por otro lado, no existen metodologías generalizadas aceptadas que posean características de consistencia y precisión para asociar los resultados del inventario con impactos ambientales potenciales específicos.

4.3.4 .Análisis de Mejoras

Es importante recordar que los resultados del Análisis de Ciclo de Vida constituyen un apoyo en el proceso de la toma de decisiones y que son una aproximación a la realidad.

Dentro de las diferentes fases del ciclo de vida, los impactos en la *fase de extracción de materia prima* están relacionados con el origen del material. Materiales no renovables tienen un impacto mayor a materiales renovables. Además, la energía necesaria en el proceso de extracción es un factor determinante en esta fase.

En la *fase de producción*, la efectividad y la cantidad de los insumos en el proceso de producción como la energía y el agua, al igual que los residuos de producción y emisiones son factores determinantes importantes en el impacto ambiental.

El tratamiento en la última fase del ciclo de vida, *la disposición final*, juega un papel importante respecto al impacto ambiental para los casos en los que la vida útil del producto es muy corta; especialmente para los envases y empaques esta fase determina gran parte del impacto total durante el ciclo de vida. Por tal razón la industria internacional del plástico tiene especial interés en los estudios de ciclo de vida defendiendo su concepto como un método para demostrar y optimizar los recursos, la eficacia, la funcionalidad y las características de desempeño de los plásticos a lo largo de toda la cadena de beneficios que

ofrecen sus productos al tiempo que contribuye en las medidas de mitigación de emisiones e impactos ambientales.

4.4 Análisis de Ciclo de Vida Exergético

La visión tradicional del Análisis de Ciclo de Vida no considera la valoración de perfección termodinámica de un sistema, por lo que, tomando como base este enfoque en combinación con el análisis exergético, se ha desarrollado el Análisis de Ciclo de Vida Exergético (ELCA, por sus siglas en inglés), el cual proporciona un mejor parámetro acerca del agotamiento de los recursos naturales gracias al concepto de irreversibilidad en el ciclo de vida de un producto o proceso.

Este estudio examina los flujos de exergía y busca reducir la destrucción de la misma para el mejoramiento de la eficiencia y efectividad de procesos y sistemas. El consumo de exergía correspondiente al uso de un combustible fósil puede ser evaluado a través de la siguiente expresión [33]:

$$\dot{E}x_{LFC}^i = \dot{E}x_{dir}^i + \Delta\dot{E}x_{dir}^i + \Delta\dot{E}x_{ind}^i \dots \dots \dots ec. 4.1)$$

Donde:

$\dot{E}x_{LFC}^i$: ciclo de vida de consumo de exergía.

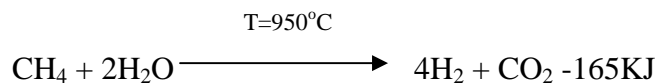
$\dot{E}x_{dir}^i$: proporción de exergía que es transformada directamente a productos finales.

$\Delta\dot{E}x_{dir}^i$: es la proporción de exergía de combustible consumida para realizar la transformación.

$\Delta\dot{E}x_{ind}^i$: es la proporción de exergía de combustible consumida en la construcción de materiales y equipo, así como durante la instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento.

La diferencia entre $\dot{E}x_{dir}^i$ y $\Delta\dot{E}x_{dir}^i$ puede ser explicada considerando el siguiente ejemplo:

La suma de las reacciones para producir hidrógeno a través de gas natural es:



Como se puede observar en la reacción, la cual es endotérmica, un flujo de metano es directamente transformado a hidrógeno. La reacción es realizada a elevada temperatura la cual es, por lo general, suministrada por la combustión de otro flujo de metano de acuerdo a:



En este ejemplo $\dot{E}x_{dir}^i$ incluye la exergía del metano utilizado en la primera reacción para la obtención de hidrógeno y $\Delta\dot{E}x_{dir}^i$ abarca la exergía del metano empleado para la combustión.

Las exergías químicas estándar de la mayoría de los combustibles son similares a sus valores calóricos bajos, los cuales son iguales al calor liberado por la combustión completa de todos los componentes del combustible a CO₂ y H₂O.

4.5 Software para Análisis de Ciclo de Vida

Ejecutar un estudio de ACV es un trabajo complejo y largo por la cantidad de datos y la complejidad de la interpretación de los mismos. Además, los procedimientos de trabajo requieren gran cantidad de cálculos repetitivos. Por estas razones, el uso de software especializado ha sido fundamental en el desarrollo de estudios de ACV. En el mercado existen alrededor de 30 programas diferentes de software con bases de datos para evaluar productos y procesos. En general, los programas son aplicaciones de “spread-sheets” como Excel; los programas se diferencian en las bases de datos y en las posibilidades gráficas de los informes.

En las siguientes tablas 4.2 y 4.3 se presentan los principales software existentes para la realización del Análisis de Ciclo de Vida a través de los cuales es posible obtener una cuantificación de los Impactos Ambientales conforme a ISO 14040 así como bases de datos comercialmente disponibles [58], [59]:

Tabla 4.2 Software para Análisis de Ciclo de Vida.	
<i>Software</i>	<i>Contacto</i>
Sima Pro	Pre consultancy, Holanda (http://www.pre.nl)
Ecomanager	Frankling Associates, PIRA international, Reino Unido
Boustead Model	Ian Boustead, Reino Unido, (+44403864561)
Ecopro	EMPA, Suiza, (+71300101)
EcoSys	Sandia National Laboratories, (+5058443387)
EPS	Swedish Environmental Research Institute (+4687291500)
IDEA	International Institute for Applied System Analysis (IIASA) (+432236715521)

Tabla 4.3 Bases de Datos sobre Análisis de Ciclo de Vida.	
<i>Base de datos</i>	<i>Contacto</i>
Bugwal	Institute for energy and Cryoprocesses, ETH Zentrum, (+41 1 2625141)
Canadian Raw Materials Database	Environment Canada, solid Waste Managment división, PUM, (+891 953 1112)
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research (+71 20 9141)
Environment Resource Guide (ERG)	American Institute of Architects (+ 202 6267300)
PWI	European Centre for Plastics in the environment (+32 2 6753258)
Franklin US LCI database	Franklin Associates, USA,(913 6496494)
IVAM	IVAM Environmental Research (http://www.ivam.nl)
FEFCO	European Association of Corrugated Board Manufacturers, France
IDEMAT	Technical university of Delft (http://www.tud.nl)

4.5.1 Sima Pro

Sima Pro es un programa ampliamente utilizado desde 1990 en Análisis de Ciclo de Vida que representa una herramienta para recopilar, analizar y monitorear el desempeño ambiental de productos y servicios permitiendo la modelación de ciclos de vida complejos de forma sistémica y transparente en base a las recomendaciones de la serie ISO 14040.

Las versiones más recientes del programa permiten realizar de manera completa y detallada la Evaluación de Impactos Ambientales en cada una de sus fases (Clasificación, Caracterización, Normalización y Ponderación).

En este trabajo el software no fue empleado para el cálculo de cargas ambientales (como generalmente se aplica), sino sólo como una base de datos acerca de las emisiones atmosféricas generadas en los procesos involucrados en cada uno de los tres materiales tratados.

Sima Pro tiene dos módulos para elaborar el ACV [60]:

1. Módulo de inventario: esta base de datos contiene procesos estándares, basado en estudios anteriores hechos en Europa y E.E.U.U. Cuando no se consiguen datos de productos o procesos específicos, se puede hacer una primera estimación utilizando la información estándar que tiene el programa. Es importante señalar por lo tanto, que en América Latina apenas se está comenzando con la creación de bases de datos de procesos siendo uno de los pioneros Cuba que actualmente presenta un avance considerable en modelos matemáticos para su modelación.
2. Módulo de impacto ambiental: esta base de datos contiene los diferentes métodos (métodos de asignación de impactos) para el cálculo de impactos.

Es importante que además de plantear el objetivo y alcance al inicio del análisis se especifique en la sección de “datos generales” las características de los datos manejados así como las referencias de los cuales fueron obtenidos antes de comenzar con la segunda etapa de la creación del proyecto.

Los procesos de inventarios en las bases de datos de Sima Pro están repartidos en cinco categorías cada una de las cuales está dividida en sub-categorías. La clasificación general de estos procesos es:

- Procesos de Materiales
- Procesos Energéticos
- Procesos de Transporte
- Procesos de Transformaciones
- Tratamiento de Residuos

Las categorías de impacto se definen como las áreas en las que el ciclo de vida de un producto tiene intervenciones en el ambiente y busca cubrir los aspectos más relevantes que interesan a una empresa, sociedad y/o autoridades. Entre estas categorías se encuentran cambio climático, acidificación, uso de suelo, eutrofización, ozono troposférico, ecotoxicidad, toxicidad humana. Este ejemplo se muestra para tener un conocimiento general sobre el alcance del software; sin embargo, no es propósito de esta tesis llevar a cabo este tipo de estudio.

La Metodología de este trabajo describe más adelante la manera en la cual fueron calculadas las exergías de emisiones atmosféricas utilizando la base de datos de Sima Pro, lo que se pretende hasta el momento es que el lector conozca la estructura general del software.

4.6 Ejemplo de Estudio de Ciclo de Vida Exergético.

La aplicación del ciclo de vida exergético puede quedar ilustrada mediante el estudio que Cornelissen [50] llevó a cabo con las tazas de poliestireno versus tazas de porcelana cuyas características se especifican en la tabla 4.4:

Material	Componentes
Poliestireno	Hechas a partir de petróleo crudo como materia prima inicial seguido de procesos para la formación de etilbenceno partiendo de etileno y benceno; asimismo tiene lugar una deshidrogenación del etilbenceno para la obtención de estireno, siendo la polimerización el último proceso para la formación del poliestireno.
Porcelana	Hechas de una mezcla de minerales, los cuales consisten principalmente de caolín (50%), feldespato (25%) y cuarzo (25%). El caolín y el feldespato a su vez están formados principalmente de Al_2O_3 y SiO_2 en diferentes cantidades, mientras que el cuarzo consiste principalmente de SiO_2 y es utilizado como material de fusión.

La unidad funcional para el estudio fue definida en base a 3000 tazas de poliestireno cada una de las cuales se utiliza una vez contra el impacto provocado por el uso de una taza de porcelana 3000 veces (considerando que ésta será lavada después de cada uso). La composición de las tazas de poliestireno es 49% de poliestireno de alto impacto, 49% de poliestireno de uso general y 2% de TiO_2 como colorante; mientras que la taza de porcelana está constituida por una mezcla de minerales en una proporción de 50% de caolín, 25% de feldespato y 25% de cuarzo, de los cuales el caolín y feldespato están conformados por Al_2O_3 principalmente y el cuarzo de SiO_2

De acuerdo al análisis de ciclo de vida exergético, las tazas de poliestireno utilizan el doble de la exergía correspondiente a fuentes naturales en comparación con las tazas de porcelana. Los resultados de eficiencias en el análisis de ciclo de vida exergético se muestran a través de las figuras 4.4. y 4.5:

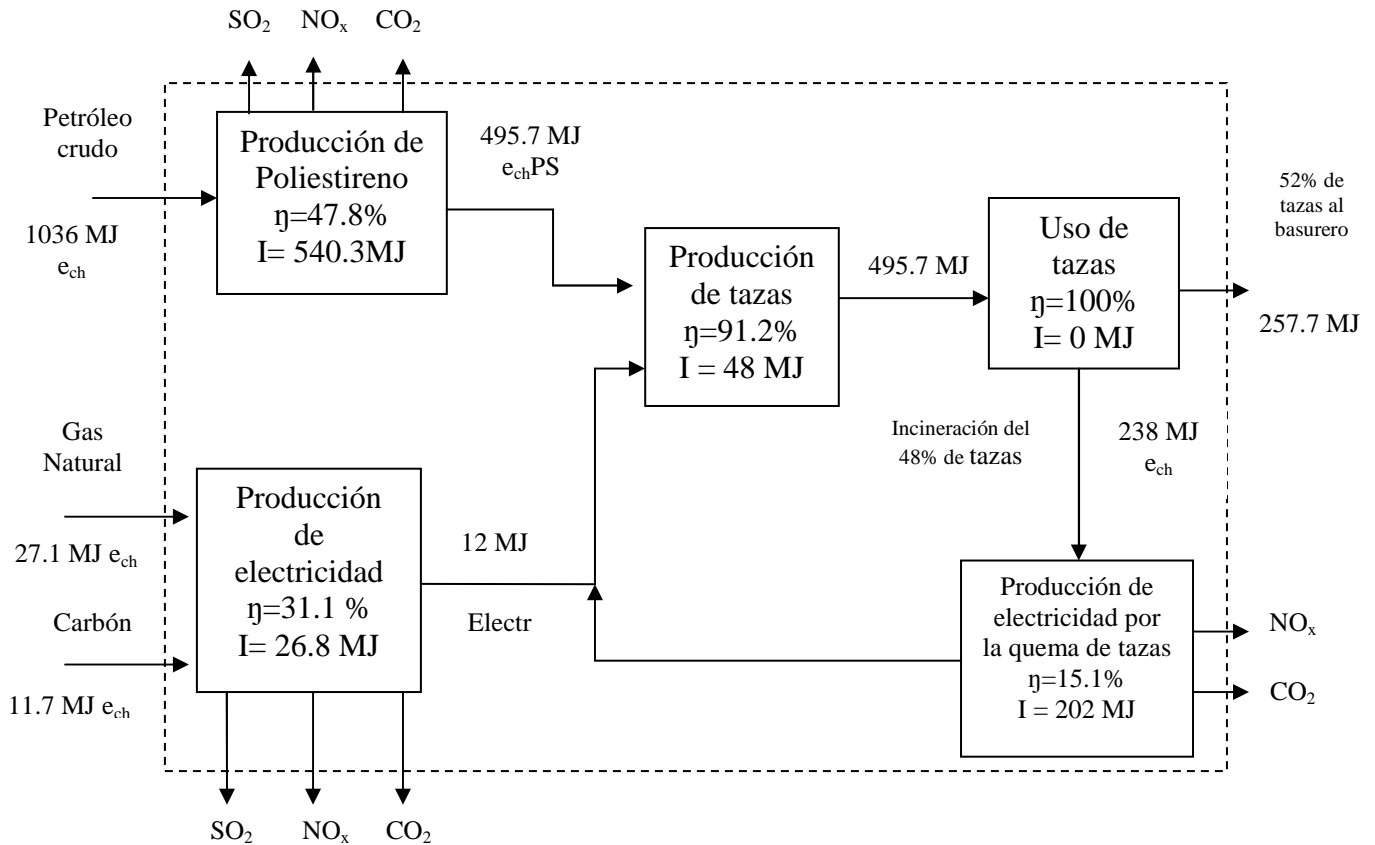


Figura 4.4 Análisis de Ciclo de Vida Exergético para 3000 tazas de poliestireno.

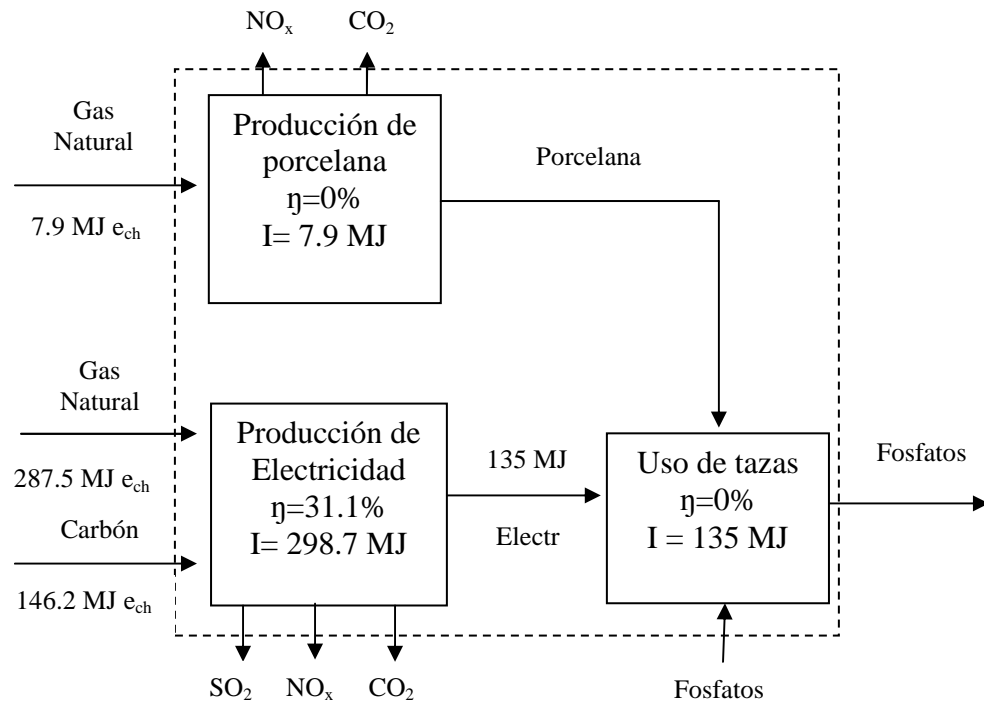


Figura 4.5 Análisis de Ciclo de Vida Exergético de una taza de porcelana utilizada 3000 veces.

Las causas principales de irreversibilidad en las tasas de poliestireno se deben principalmente a la producción del poliestireno y la quema de los residuos en la planta de incineración; mientras que las principales irreversibilidades en el caso de las tasas de porcelana se deben a la generación de electricidad y al lavado de éstas.

La irreversibilidad del ciclo de vida para las 3000 tazas de poliestireno es 817 MJ, mientras que para la taza de porcelana resultó ser igual a 442 MJ, es decir, 1.85 veces menos respecto a las primeras.

De manera similar al ejemplo anterior, en el presente trabajo se proporcionará el valor de irreversibilidad global resultante en el proceso de producción primario de envases para PET, vidrio y aluminio y así disponer de una cuantificación del material que representa la mayor pérdida de exergía y, por lo tanto, de un menor uso eficiente de energía; además de que se contará con la exergía emitida como gases de efecto invernadero para cada caso. Posteriormente, el análisis de exergía se llevará a cabo para Reciclaje e Incineración como alternativas de disposición adecuada de los envases utilizados y desechados, lo anterior con la finalidad de evaluar el comportamiento de perfección termodinámica de éstas en comparación con la producción a partir de materias primas de origen. Por lo tanto, los elementos aportados por el presente documento pretenden constituir un criterio científico para la toma de decisión en el tema de residuos sólidos urbanos desde la perspectiva termodinámica. A diferencia de la investigación realizada por Cornelissen, el software Sima Pro, en este estudio sólo se empleará la base de datos de emisiones atmosféricas a través de tecnologías estándar, ya que no es alcance de esta tesis el desarrollo de un mecanismo ambiental para la obtención de impactos ambientales categorizados, los cuales, como ya se ha explicado, consisten en normalizaciones realizadas por un panel de expertos en base a diferentes modelos matemáticos.

CAPÍTULO 5

ENVASES

5.1 Introducción

En este capítulo pretendemos explicar la utilización de los envases para bebidas así como la descripción de su producción, y en su caso, el reciclaje de los mismos. No es intención de esta tesis profundizar en el estudio de las alternativas sino sólo dejar clara la forma en que se puede llevar a cabo la posible sustitución del PET, por envases de vidrio y aluminio.

Según la directiva de la Unión Europea y Comunidad Económica Europea, se denomina envase a: “Cualquier producto de cualquier naturaleza y material que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías así como los artículos desechables utilizados con ese mismo fin” [61].

La sociedad actual no se puede concebir sin la existencia de los envases, ya que éstos representan un importante vehículo para proveer al consumidor de un producto seguro, confiable y adecuado para su uso.

Los envases se utilizan para proteger, *conservar, transportar y manipular los productos*; sin embargo, para justificar la existencia de los envases éstos deben poseer las siguientes características [62]:

- Prácticos: que el producto sea fácilmente manipulado por el consumidor.
- Seguros: el producto debe permanecer en un ambiente inerte durante su manipulación y transporte.
- Amigables con el producto: el envase no debe causar ningún daño al producto y debe permitir diferenciar al producto del resto.
- Amigables con el ambiente: los materiales del envase deben ser sustentables al momento de su fabricación y reciclables al post-consumo.

Por lo tanto, de acuerdo a los parámetros anteriores, se puede visualizar que son diversos y complejos los factores que influyen en torno a los sectores de la sociedad los que influyen para que los envases sean o no considerados como sustentables, debido a que la sustentabilidad también está determinada por la disponibilidad de las materias primas utilizadas en su fabricación, así como la optimización de los recursos en su producción, consumo y post-consumo.

Una clasificación del envasado en función a las opciones de disposición final y aprovechamiento de materiales es la sugerida por la SEMARNAT en la publicación de su Guía de Envasado [31]:

- *Envase cero*: durante la etapa de investigación y desarrollo de un producto, antes de su introducción al mercado.
- *Envase mínimo*: deben estudiarse métodos alternativos de diseño de productos y envases, con el fin de reducir al mínimo la cantidad requerida para el envase.
- *Envase retornable*: se trata de contenedores que pueden ser devueltos a empresas o industrias para su reuso.
- *Envase rellenable*: es aquel que puede ser rellenado por el consumidor.
- *Envase reciclable*: un envase se considera reciclable si existe un sistema económicamente viable y disponible para la recolección, procesamiento y comercialización del material que lo constituye.

5.2 Envases Plásticos

Los plásticos son sustancias orgánicas de alto peso molecular que se sintetizan generalmente a partir de compuestos de bajo peso molecular. También pueden obtenerse por modificación química de materiales naturales de alto peso molecular (en especial la celulosa). La mayoría de los compuestos denominados “plásticos” son polímeros sintetizados a partir de compuestos orgánicos.

Los plásticos se caracterizan por una alta relación resistencia/densidad, que son propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y solventes. Las enormes moléculas de las que están integradas pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico.

Los polímeros pueden existir en la naturaleza como biopolímeros, o bien ser producidos sintéticamente, para la obtención de estos últimos se presupone la disponibilidad de materias primas y energía suficiente. El petróleo es actualmente la principal fuente de materia prima para los polímeros sintéticos. A diferencia de los polímeros naturales, los polímeros sintéticos no se oxidan o no son fácilmente degradados al medio ambiente provocando una acumulación a gran escala. Así, la mayoría de las aplicaciones de polímeros sintéticos están basadas en su relativa resistencia a la degradación ambiental incluyendo la biodegradación.

Los polímeros se clasifican en diversas formas, de acuerdo a su estructura y propiedades del producto final se dividen en dos grandes grupos [63]:

- a) **Polímeros termoplásticos**: este tipo de polímeros son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero cuando se someten a temperaturas superiores se convierten en líquidos viscosos. Esta característica permite conformarlos fácil y económicamente en productos útiles. Ejemplos de termoplásticos: Poliamida, Polibuteno, Policarbonato, Polietileno, Polietileno baja densidad, Polietileno alta densidad, Tereftalato de Polietileno, Polipropileno, Poliestireno, Cloruro de Polivinilo.
- b) **Polímeros termoestables o termofijos**: son aquellos que no toleran ciclos repetidos de calentamiento como lo hacen los termoplásticos. Con un calentamiento inicial se ablandan y fluyen para ser moldeado, pero las temperaturas elevadas producen también una reacción química que endurece el material y lo convierte en un sólido

infusible. Si este polímero termoestable se vuelve a calentar, se degrada por pirolisis en lugar de ablandarse.

- c) Elastómeros: son polímeros que exhiben una extrema extensibilidad elástica cuando se sujetan a esfuerzos mecánicos relativamente bajos. Algunos elastómeros pueden estirarse alargando 10 veces su longitud y luego recuperar completamente su forma original.

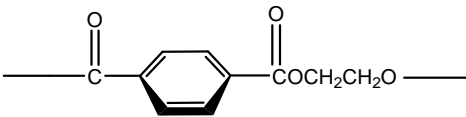
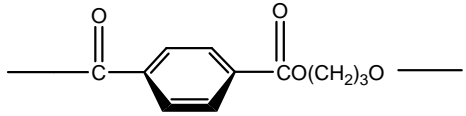
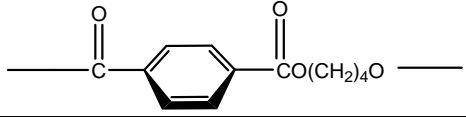
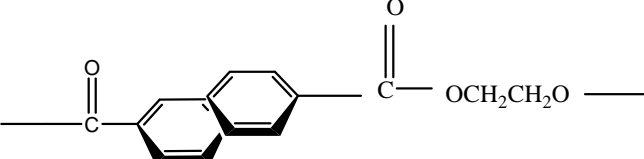
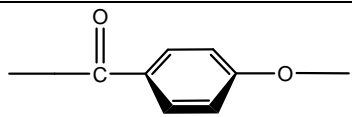
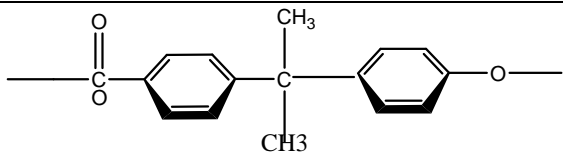
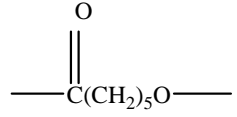
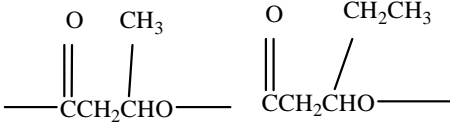
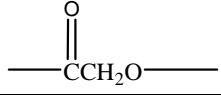
La mayoría de los fabricantes de envases plásticos codifican sus productos con un número del 1 al 7 para representar a las resinas más comunes lo cual facilita la separación y el reciclaje. En seguida se presenta una tabla 5.1 de codificación SPI (Society of the Plastics Industry) [64]:

Tabla 5.1 Codificación de plásticos comerciales.		
<i>Material</i>	<i>Código SPI</i>	<i>Uso</i>
Tereftalato de Polietileno	1-PET	Botellas de refrescos carbónicos, recipientes para comida
Polietileno de alta densidad	2-PE-HD	Botellas de leche, botellas de detergente, productos en forma de láminas para bolsas.
Policloruro de Vinilo	3-PVC	Recipientes domésticos y de comida, tuberías.
Polietileno de baja densidad	4-PE-LD	Envase de película fina y envoltorios.
Polipropileno	5-PP	Cajas para botellas, maletas, tapas y etiquetas.
Poliestireno	6-PS	Vasos y platos de espuma, artículos moldeados por inyección.
Otras resinas y materiales multilaminados.	7-Otros	Plásticos no seleccionados.

Así como cualquier otro material, los envases plásticos sufren un desgaste que en términos de degradación polimérica se clasifican en [65]:

- Degradación ambiental: referente al polímero sometido a la influencia de los elementos naturales o bien a los efectos del uso o las condiciones de aplicación sobre su vida útil. Todos los polímeros sujetos a exposiciones a la atmósfera se degradan de diferente manera, dependiendo de su composición.
- Degradación acelerada: consiste en someter al material polimérico a condiciones climatológicas diferentes a las cuales fue diseñado, lo que va a repercutir en su tiempo de vida útil.

primero de ellos usado como fibras textiles y el segundo tanto en fibras como plástico de envase. En efecto, el Poli(Tereftalato de Etileno) puede ser considerado como el poliéster industrial de batalla.

Tabla 5.2 Poliésteres lineales comercialmente disponibles.	
Nombre	Estructura principal
Poli(Tereftalato de Etileno, PET)	
Poli(Tereftalato de Trimetileno)	
Poli(Tereftalato de Butileno, PBT)	
Poli(naftaleno-2,6-dicarboxilato de Etileno, PEN)	
Poli(4-hidroxibenzoato)	
Poli(tereftalato/isoftalato bisfenol A)	
Policarbonato	
Policaprolactona	
Poli(3-hidroxibutirato/valerato, PHBV)	
Poli(ácido glicólico)	

El Poli (Tereftalato de Etileno) es un termoplástico obtenido a partir de condensación mediante un proceso de polimerización en fase fundida continúa sin formación de enlace químico entre cadenas. El PET fue patentado como un polímero para fibra por J.R. Whinfield y J.T Dickson en 1941. La producción comercial de fibra de poliéster comenzó

en 1955 y desde entonces el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico hasta lograr un alto nivel de sofisticación basado en el espectacular crecimiento en la demanda del producto a escala mundial y a la diversificación de sus posibilidades de uso [69].

La primera aplicación industrial del PET fue en textiles durante la segunda guerra mundial para reemplazar a las fibras naturales como algodón o lino. A diferencia de otras fibras sintéticas, al poliéster (PET de grado textil) se le reconocieron desde el primer momento excelentes cualidades para el proceso textil entre las que se debe señalar la alta resistencia a la deformación y su estabilidad dimensional así como el fácil cuidado de la prenda tejida debido al lavado y secado rápido, entre las desventajas para esta aplicación se puede mencionar la dificultad de tintura, acumulación de electricidad estática y el tacto duro de los tejidos.

A partir de 1976 el PET se usa para fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente para bebidas, aunque también ha tenido un desarrollo potencial para empaques.

En México se comenzó a utilizar para la fabricación de envases a mediados de la década de los ochenta y ha tenido gran aceptación por parte del consumidor así como del productor, por lo que su uso se ha incrementado de manera considerable año tras año.

Para la obtención de PET el gránulo de resina cristalizado se carga en un reactor durante tiempos muy largos sometándose a un flujo de gas inerte (N_2) a temperatura superior a los $200^\circ C$ aumentando el peso molecular de la resina hasta valores correspondientes de viscosidad intrínseca en un rango de 0.72-0.84 idóneo para la fabricación de botellas. El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento de peso molecular [70].

Un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el para-xileno y se oxida con el aire para formar ácido tereftálico. El etileno que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado para formar etilenglicol. El PET se produce de la reacción del ácido tereftálico y el etilenglicol.

Actualmente, el principal uso para el PET es la fabricación de envases para:

- Refrescos
- Agua purificada
- Alimentos
- Medicinas
- Productos de limpieza
- Productos de aseo personal
- Cosméticos

En búsqueda de mejores materiales los científicos han invertido esfuerzos, energía y recursos económicos en lo que ha llevado a desarrollar polímeros sintéticos fuertes, estables y durables. Los polímeros se han convertido en materiales de importancia para el

desarrollo científico y tecnológico así como para el estándar de vida de forma tal que la sociedad moderna no puede vivir o progresar sin polímeros.

5.3 Reciclaje de PET

La economía constituye un factor determinante respecto a los materiales que pueden ser reciclados y cuáles deben ser sólo depositados. Por mucho tiempo, ha habido pocos incentivos para el reciclaje, ya que el costo de éste es tan elástico como el precio de materiales vírgenes. Lo anterior es claramente mostrado con las tasas de reciclaje de varios productos contra las tendencias de precio general para materiales vírgenes. Sin embargo, este no es el único componente de la ecuación económica general para la decisión de reciclaje. El reciclaje afecta a la industria química en muchas maneras debido a que éste reduce el consumo neto de químicos seguros a las entradas de manufactura debido al retorno de éstos a la cadena de valor. Con el fin de reciclar ciertos químicos, son requeridos otros químicos vírgenes seguros. Algunos de estos pueden ser agentes o reactivos usados en la producción original de polímeros o químicos, y otros son usados rápidamente para el reciclaje de varios materiales y posteriormente son recuperados. Se han creado nuevos mercados a raíz de estos materiales requeridos en el reciclaje. El pronóstico de las tasas de reciclaje indica un incremento para la próxima década debido al crecimiento en la escasez y a los precios elevados, existiendo interés por muchos metales y actividad minera entre otras actividades. Pero para el futuro inmediato, la producción virgen crecerá probablemente más rápido respecto a las tasas de reciclaje [70].

Hablando de plásticos, éstos tienen un valor bajo porque los materiales vírgenes son relativamente baratos. Existe un escaso incentivo financiero para su recolección, por lo tanto hay que legislar su reciclaje.

Por otra parte, la infraestructura para la recolección y procesamiento de plásticos está limitada o definida de acuerdo a zonas, por lo que muchos consumidores que desean reciclar se encuentran con esta problemática. El peso relativamente bajo, obliga también a las comunidades con programas de desviación a enfocarse en otros materiales. Las botellas de plástico llevadas a procesamiento con frecuencia se encuentran contaminadas por elementos extraños que causan un desgaste prematuro sobre los granuladores y otros equipos; los plásticos no compatibles degradan la calidad del material reciclado por lo que es preciso separarlos. Las mezclas de plásticos incompatibles cuando son extruidas presentan huecos y estructuras laminares con propiedades mecánicas insuficientes [71].

5.3.1 Tipos de reciclaje de PET

a) Reciclaje Mecánico.

Consiste en un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o industrial (scrap) es recuperando permitiendo su posterior utilización.

El PET se recicla principalmente en fibras de poliéster utilizadas para fabricar almohadas, ropa de invierno, películas, correas, envases de comida y productos de la industria automotriz, mientras que el uso de material reciclado para botellas de bebidas carbonatadas fue aprobado por la Administración de Alimentación y Salud en enero de 1991 [72].

Enseguida se enlistan las etapas del proceso de reciclaje del PET [69]:

1) Rotura de Balas y selección

Las balas preseleccionadas se rompen y se depositan en una cinta transportadora para su selección final; se seleccionan las botellas de PET manualmente según su color. En la actualidad se dispone de equipos automáticos para esta selección aunque la mayoría de los recicladores en México utilizan mano de obra para esta etapa.

2) Granulación y lavado

Las botellas se transforman en pequeños trozos a través de una granuladora diseñada para no causar calor excesivo ya que de lo contrario los fundiría. Los trozos se lavan con agua caliente, detergentes y agitación para separar etiquetas, adhesivos y suciedad por medio de un separador centrífugo.

3) Separación

Después del lavado el material se dirige al depósito de asentamiento, donde el PET se hunde en el fondo y flotan los plásticos más ligeros. Si la alimentación se acerca a la homogeneidad puede ser suficiente un solo depósito pero en las mezclas que no se pueden separar fácilmente se necesita una serie de hidrociclones (separadores ciclón o centrífugos).

4) Secado

Después de la separación, el flujo original de botellas se ha convertido en un flujo de PET al cual se le somete a un secador centrífugo para separar el agua y se procede a secar los trozos con aire caliente para reducir el contenido de humedad hasta un aproximado de 0.5%.

5) Separación electrostática

Las botellas de PET a menudo contienen tapas de aluminio cuando se empaacan, la eliminación de éstas se consigue por medio de separación electrostática.

6) Extrusión de Recuperación

Se fluidiza la resina utilizando un tornillo de extrusión el cual consiste en un tornillo sinfín dentro de un cilindro. Los trozos se colocan en la extrusora en el extremo del tornillo con el diámetro más grande y se comprimen mientras se llevan hacia la boquilla de extrusión. El calor combinado de la fricción producida por el flujo y de las bandas de calefacción suplementarias provoca la fundición de la resina, extrayéndose de la mezcla los contaminantes volátiles. Inmediatamente antes de la boquilla, la mezcla fundida pasa a través de una criba fina que separa las impurezas sólidas restantes, este paso se conoce como filtración del fundido.

7) Peletización

El líquido extraído de la boquilla tiene características de un fideo largo. Mientras pasa a través del orificio una cuchilla giratoria corta el fideo en segmentos cortos que caen en un baño de agua donde se enfrían. Los pellets se secan en un secador centrífugo hasta alcanzar un contenido de humedad del 0.5% y se envasan para su transporte hasta el cliente.

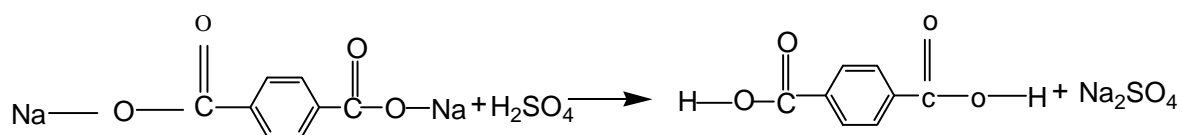
b) Reciclaje Químico

El aumento en el consumo de materiales plásticos como el PET, y por lo tanto, el incremento en la utilización de hidrocarburos para la elaboración de los mismos, en conjunto con la posibilidad de la obtención de materias primas a partir de envases post-consumo ha llevado a desarrollar tecnologías cada vez más avanzadas con el propósito de tratar este tipo de residuos adquiriendo el mayor rendimiento en el proceso de reciclaje. Lo anterior ha conducido al Reciclaje Químico, el cual consiste en procesos mediante los cuales las moléculas de los polímeros son craqueadas dando origen nuevamente a materia prima básica que puede ser utilizada para fabricar nuevos plásticos. Este tipo de reciclaje se puede llevar a cabo principalmente a través de cinco tipos de reacciones de depolimerización, mismas que se describen a continuación [73].

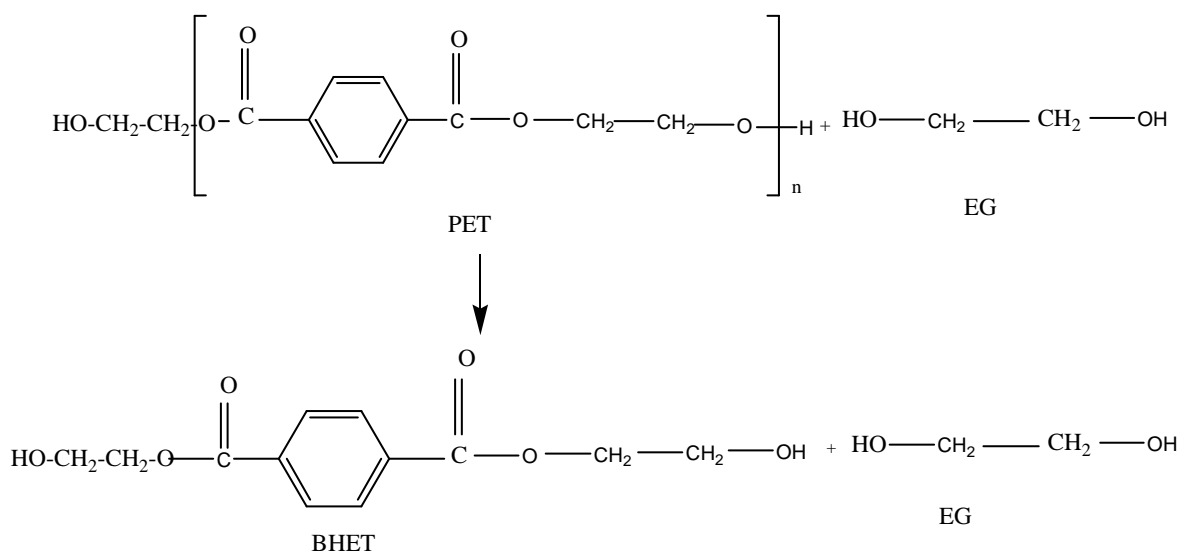
Metanólisis: los productos resultantes tras someter el desperdicio de PET a una reacción de metanólisis son Tereftalato de Dimetilo y Etilenglicol; el proceso es realizado a diferentes temperaturas y presiones elevadas debido a la alta presión de vapor del metanol. Los trabajos científicos realizados al respecto han llevado a predecir las condiciones óptimas de la reacción con un tiempo de 40-60 minutos, temperatura de 533-543 K y una presión de 9-11 MPa. Un problema frecuente en metanólisis es la separación de etilenglicol a partir del Tereftalato de Dimetilo así como los residuos de catalizador, mientras que el metanol es fácilmente eliminado debido a su bajo punto de ebullición; para solucionar esto se ha experimentado con una extracción líquido-líquido adicionando benzoato de metilo y agua. En algunos procesos se lleva a cabo una etapa más de hidrólisis para convertir el Tereftalato de Dimetilo en Ácido Tereftálico el cual es el más requerido en la producción de PET actualmente. Mitsubishi Heavy Industries, una de las compañías más activas en reciclaje químico de PET reporta que la depolimerización por metanólisis supercrítica resultaría rentable a una escala de 20,000-40,000 Ton/año de residuos de PET.

Hidrólisis: esta reacción permite la recuperación de Ácido Tereftálico y Etilenglicol, puede llevarse a cabo en medio ácido, básico o bien, en condiciones neutras. El rendimiento alcanzado bajo condiciones neutras a 275°C en la recuperación de ácido tereftálico es del

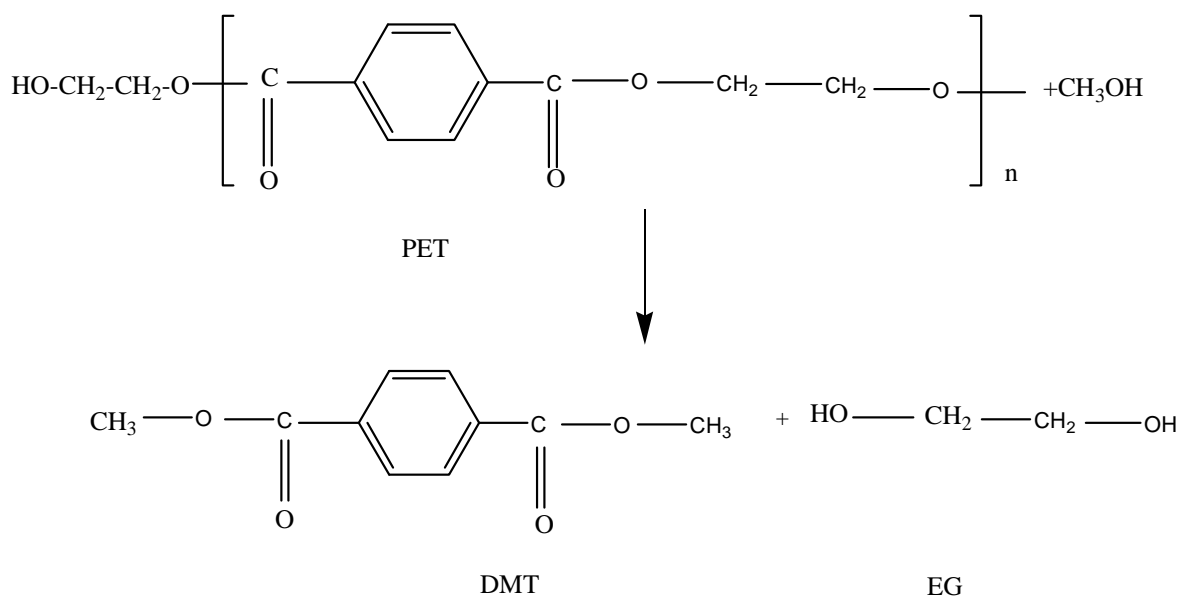
95% en promedio en un lapso de 1 hora, aunque son necesarias más operaciones de purificación para eliminar pigmentos y otras impurezas como pueden ser residuos catalíticos y compuestos orgánicos resultantes de la reacción de depolimerización. En el caso de residuos de poliésteres como hilo o telas, éstos son despolimerizados con una mezcla de ácido sulfúrico y agua para formar ácido tereftálico crudo, la solución obtenida es precipitada, filtrada y lavada. El ácido tereftálico como producto de esta operación simple no es muy puro y puede presentar coloración oscura o amarillenta por lo que hasta el momento no constituye económicamente un proceso de reemplazo del proceso de obtención de ácido a partir de para-xileno.



Glicólisis: permite la obtención de BHET (bis (hydroxyethyl terephthalate)), el cual puede ser utilizado directamente en la síntesis del PET aunque se presentan algunos problemas concernientes a la purificación del BHET debido a los iones metálicos derivados de los residuos de catalizador así como la minimización de contaminantes orgánicos, mismos que pueden conferir una coloración amarillenta indeseable. La glicólisis se puede llevar a cabo en un solvente como xileno usando etilenglicol u otros glicoles y pudiendo manejar bajas temperaturas con la obtención de productos con alta pureza. Para acelerar este proceso se ha experimentado con la utilización de radiación de microondas con lo cual se consigue un tiempo de reacción entre 4 y 10 minutos, suficiente para la degradación completa del PET [74].



Amonólisis: a través de esta reacción es posible obtener tereftalamida (TAD) y etilenglicol generalmente mediante el uso de amoniaco concentrado. En términos económicos la tereftalamida no es un químico de interés; sin embargo, se puede convertir en compuestos como tereftalonitrilo, el cual a su vez es empleado en la producción de diaminas utilizadas como monómeros destinados a la producción de poliamidas y copolímeros. General Electric proporciona cierta información del proceso de la amonólisis el cual consiste en que el PET, el amoniaco y el etilenglicol se calientan en un rango de temperatura de 120-180°C y son presurizados debido al bajo punto de ebullición del amoniaco; esta primera reacción produce tereftalamida con un rendimiento por arriba del 90% y una pureza superior al 99% así como etilenglicol. Aprovechando la insolubilidad de la tereftalamida en etilenglicol, la primera es separada y posteriormente lavada con agua de-ionizada y secada, entonces se procede con una deshidratación pirolítica para la obtención de tereftalonitrilo lo cual implica elevadas temperaturas que oscilan en un rango de 340-370°C ya que a menos de 300°C la reacción es demasiado lenta y a más de 450°C otras reacciones secundarias pueden predominar; una vez terminado el proceso, el tereftalonitrilo puede ser separado por medio de un disolvente selectivo como etanol caliente.



Aminólisis: como su nombre lo indica, el rompimiento de enlace es realizado por medio de una amina, a este tipo de reacción se ha prestado especial interés debido a la posibilidad de obtención de compuestos como tereftalohidracida en sólo dos pasos; en el primero de ellos el PET en polvo se hace reaccionar con etilenglicol mediante el uso de acetato de plomo como catalizador a 195°C y bajo presión atmosférica, en el segundo paso es adicionada hidracina monohidratada, clorobenceno y ciclohexilamina para la conversión a ácido tereftalohidroxámico y tereftalohidracida con un rendimiento superior al 90%.

A continuación se presenta el diagrama 5.1 con un resumen de las reacciones a través de las cuales se puede llevar a cabo el reciclaje químico [75]:

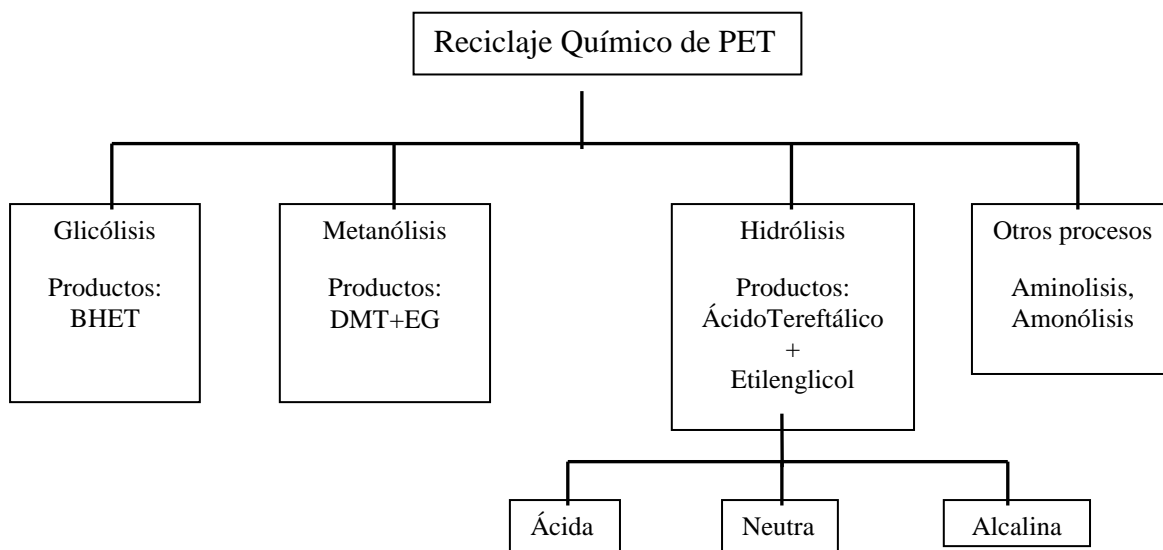


Figura. 5.1 Productos obtenidos en el reciclaje químico del Poli (Tereftalato de Etileno).

Es evidente que el reciclaje químico constituye una buena opción para obtener mayores beneficios derivados de los procesos de depolimerización. La elección de la reacción dependerá del interés particular de los industriales en algún producto específico así como las ventajas y desventajas inherentes a cada proceso.

Las tecnologías de reciclaje de PET fueron inicialmente desarrolladas en Estados Unidos, convirtiéndose Japón en el país con mayor interés actualmente en el reciclaje químico bajo la consideración antes planteada acerca de la problemática de acceso a los derivados del petróleo como materia prima.

Desde una perspectiva industrial, algunas de las variables involucradas en el proceso de reciclaje se encuentran:

- Escala de Producción
- Unidad Productiva
- Obtención de Residuos Sólidos Urbanos
- Producto final
- Estructura de la Unidad Productiva
- Recursos Humanos
- Maquinaria
- Energía.

Como se mencionó anteriormente uno de los mayores retos a enfrentar en el funcionamiento y rentabilidad de las plantas de reciclaje es el tercer inciso referente a la obtención de residuos que constituyen la materia prima.

Entre las ventajas del reciclaje químico se pueden mencionar: competitividad económica, no es necesaria una etapa de selección o lavado previa, no es necesario realización la eliminación de tapas o etiquetas, el ácido tereftálico y etilenglicol se vender directamente a la industria química, las plantas convencionales de reciclaje mecánico de PET pueden ser adaptadas para el proceso químico [69].

5.4 Envases de vidrio

El vidrio es una sustancia inorgánica dura, frágil, transparente y amorfa, conformada por bióxido de silicio (SiO_2) (arena), carbonato de sodio (Na_2CO_3), carbonato de calcio (CaCO_3) (caliza) y feldespato. Se obtiene por fusión a 1500°C , su estructura cristalina depende de su proceso de conformado térmico.

El envase de vidrio fue inventado por los egipcios 40 siglos antes de Cristo comenzando a usarse habitualmente en el Renacimiento. Desde hace mucho tiempo es el paradigma del envase ideal, al ser aún muy valorado por los consumidores; sin embargo es evidente que ha dejado de crecer su presencia en el mercado.

Algunas de las características principales del vidrio son [76]:

- 1) No tiene resistencia al impacto.
- 2) Puede adquirir diversas formas. Su maleabilidad permite obtener láminas para fabricar desde garrafones hasta ampolletas.
- 3) Es totalmente reutilizable.
- 4) Posee una naturaleza química inerte, no reacciona ante sustancias orgánicas e inorgánica, excepto al ácido fluorhídrico y álcalis concentrados.
- 5) Presenta buena asepsia.
- 6) Presenta un buen efecto de barrera contra cambios de temperatura.
- 7) No es conductor del calor y electricidad a temperatura ambiente, en cambio es buen conductor a alta temperatura.

5.4.1 Producción de vidrio

Las materias primas son seleccionadas de acuerdo a pureza, consistencia, tamaño de grano, contenido de agua, suministro, potencial de contaminación, facilidad de mezclado y fusión así como costo.

La fuente de calcio y magnesio es la caliza la cual se clasifica en dos tipos: la primera con un contenido de 56% en peso de CaO y dolomita, la segunda con 30% en peso de CaO y 21.5% en peso de MgO . Otro tipo de materias primas incluyen bórax o ácido bórico, siendo la colemanita y ulexita las fuentes preferidas. Los demás componentes se encuentran en cantidades que no afectan las propiedades físicas del vidrio. Los agentes clarificantes comunes son sulfatos, sulfitos, halogenuros, peróxidos, cloratos, percloratos, CeO_2 , MnO_2 , SnO_2 , As_2O_3 y Sb_2O_3 ; estos agentes liberan O_2 y S_2O_3 .

El contaminante primario es Fe_2O_3 seguido de titanía (rutilo), circonia y cromia. Los límites aceptables de Fe_2O_3 son 0.005-0.03 % en peso dependiendo del producto en fabricación. La caliza de alta calidad contiene 0.1% en peso de Fe_2O_3 y Ca y 1% en peso de sílice y alúmina [77].

El proceso de fabricación consiste en la fusión a alta temperatura de los tres componentes básicos del vidrio mencionados con anterioridad. Se utiliza en promedio 1240Kg. de materias primas por tonelada de vidrio producido. Fundidas éstas en el horno, se obtiene el vidrio, que sale del mismo por un canal distribuidor (feeder). Ahí se forma una gota de vidrio fundido que, introducida en el molde preparador, se transforma mediante soplado o prensado-soplado en el envase definitivo.

Las altas temperaturas requeridas para la fusión y las dificultades para darle forma hacen necesario usar fundentes. Para reducir el grado de fusión de la sílice se utiliza en Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), al que se añade Carbonato de Calcio (CaCO_3) que le confiere al vidrio la estabilidad química adecuada. Este vidrio se denomina sódico-cálcico conocido también como vidrio común que representa el mayor porcentaje de vidrio fabricado en el mundo. [78].

Para la fabricación de envases de vidrio inicialmente la materia prima como sosa cáustica (NaOH), sílice y caliza se mezclan con retazos de vidrio para que ayude al mezclado, se introduce esta mezcla en el horno. La sosa cáustica conjuntamente con la arena forma un compuesto eutéctico de menor punto de fusión, la temperatura en el horno se encuentra en un rango de 1480-1600°C. La mezcla fundida se convierte en pequeñas masas llamadas velas o cargas las cuales se dirigen hacia el molde en donde se les dará la forma a través del proceso inyección-inyección o proceso conformado- inyección.

La mezcla de materias primas a utilizar depende del tipo de vidrio deseado; por ejemplo, el vidrio para ventanas está constituido por 72% de SiO_2 , 13% Na_2CO_3 y 12% CaCO_3 , mientras que el vidrio para botellas contiene más SiO_2 y menos CaCO_3 ; por su parte el cristal, está hecho de 45% SiO_2 , 44% de PbO y 9% de K_2CO_3 ; por último, el vidrio pyrex (para equipo de laboratorio) debido a la resistencia necesaria está formado por 80% SiO_2 y 12% de B_2O_3 .

En la tabla 5.3 se muestran los requerimientos de materia necesarios para la elaboración de 1 Tonelada de vidrio [79].

Óxido de Silicio	700 Kg.
Carbonato de Sodio anhidro	230 Kg.
Carbonato de Calcio	280 Kg.
Feldespató	75.75 Kg.

Los feldespatos son un grupo de minerales constituyentes de las rocas ígneas, aunque pueden encontrarse en cualquier otro tipo de roca. Los feldespatos corresponden a los silicatos de aluminio $\text{Al}_6(\text{Si}_2\text{O}_5)_3$ y de calcio (CaSiO_3), sodio (Na_2SiO_3) o potasio (K_2SiO_3), o mezclas de estas bases.

5.4.2 Métodos de formación de vidrio

Los productos de vidrio se hacen calentando primero el vidrio a alta temperatura para producir un líquido viscoso y luego moldearlo, estirarlo y enrollarlo para darle la forma deseada [67].

Formación de láminas y placas de vidrio: aproximadamente el 85% del vidrio plano que se produce se hace por el proceso de vidrio flotado, en el cual una tira de vidrio sale del horno de fundido y flota sobre la superficie de un baño de estaño fundido. La tira de vidrio se enfría mientras pasa sobre el estaño fundido, en una atmósfera controlada químicamente. Cuando sus superficies están lo suficientemente duras, la placa de vidrio se saca del horno sin ser marcada por los rodillos y pasa por un largo horno de recocido llamado templador, donde se eliminan los esfuerzos residuales.

Soplado, prensado y moldeo de vidrio: los artículos hondos, como botellas, jarras y cubiertas de bombillas luminosas, se moldean generalmente por soplado, haciendo que el aire obligue al vidrio fundido a adaptarse a los moldes. Los artículos planos, como lentes ópticos y de faros herméticos se fabrican con un émbolo que presiona el vidrio fundido contenido en un molde.

5.5 Reciclaje de vidrio

Como se mencionó anteriormente, el vidrio es un material que puede ser reciclado prácticamente al 100% ya sea como vidrio en partícula o como botellas enteras. Procesar y generar vidrio a través de sus materia primas requiere de un alto consumo de energía, por lo que el uso de vidrio reciclado en manufactura de nuevos envases permite ahorros sustanciales de energía.

El vidrio para ser reciclado requiere de la separación previa por colores (transparente, ámbar, verde, etc.) mediante técnicas de separación mecánico-óptica. Las plantas de reciclaje modernas tiene la capacidad de detectar y rechazar las formas más comunes de contaminación en el vidrio.

Los fabricantes de recipientes de vidrio están dispuestos a pagar precios un poco más altos por el vidrio triturado que por las materias primas debido a los ahorros de energía en hornos así como una vida más larga de los mismos. La desventaja de usar vidrio usado triturado radica (como en el caso del PET) en el hecho de que casi siempre contiene contaminantes que pueden alterar el color y la calidad del producto. Aunque la demanda de vidrio triturado blanco es alta, la rentabilidad del reciclaje varía según la región del país por los costos de recolección, procesamiento y transporte.

La industria de fibra de vidrio utiliza vidrio triturado como parte integral del proceso de fabricación, pero como las especificaciones son muy estrictas, casi todo el vidrio triturado procede de operaciones propias o de otros fabricantes de vidrio.

El vidrio no seleccionado por el color es aceptable para la fabricación de material de pavimento (glasphalt) y materiales de construcción, aunque primero se deben separar contaminantes como metales féreos, aluminio y papel, mediante procesos magnéticos y de vacío [28].

Al utilizar una mezcla de 50% de vidrio reciclable y 50% de materias primas vírgenes se logran los siguientes ahorros: 50% de consumo de agua, 79% de los residuos mineros y 14% de los contaminantes del aire [31].

5.6 Latas de Aluminio

A finales del siglo XVIII y principios del XIX muchos científicos trabajaron en el aislamiento del aluminio incluyendo Lavoisier, Dalton, Berzelius, Davy y Oersted. En 1825 Hans Christian Oersted descubrió un método cloruro de aluminio anhidro, compuesto que representó un papel importante en la producción del metal, por lo que en ocasiones se le otorga el crédito del descubrimiento del aluminio. En 1827 Friedrich Wöhler consiguió aislar el aluminio en base a una reacción de cloruro de aluminio anhidro con potasio sobre un crisol de porcelana. Posteriormente en 1854 H. Sainte-Claire Deville mejoró el método anterior y fue el primero en utilizar criolita como solvente para el óxido de aluminio [77].

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la superficie terrestre después del silicio, normalmente se encuentra combinado con otros elementos y raramente se halla en su estado puro. Aparece en una amplia variedad de minerales combinado con oxígeno, sílice, metales alcalinos y alcalino-térreos y flúor, así como en forma de hidróxidos, sulfatos y fosfatos. Los minerales de aluminio son bastante estables, por lo que se requieren grandes cantidades de energía y elevadas temperaturas para reducirlos a metal.

De todos los metales utilizados para la industria, el 20% son no ferrosos, éstos, en diferentes aleaciones cubren los requerimientos de ingeniería y las propiedades químicas necesarias. La selección de una aleación determinada dependerá de los resultados de las pruebas mecánicas, el volumen y costo de producción y las propiedades estéticas del producto. La mayoría de los metales no ferrosos son más resistentes a la corrosión o a la humedad, pueden utilizarse en exteriores sin pinturas o recubrimientos. Sin embargo, se debe tener especial cuidado con el manejo de los metales no ferrosos ya que cada uno responde de manera particular a los efectos de la naturaleza; por ejemplo el magnesio resiste muy bien la atmósfera ordinaria, pero se corroe rápidamente con el agua de mar.

La producción de los metales no ferrosos tiene como base los siguientes procesos:

1. *Extracción:* los metales no ferrosos provienen de minerales que se pueden encontrar en la superficie de la tierra, o bien, en yacimientos bajo la superficie. En ambos casos se deben seguir técnicas de explotación eficiente y rentable.

2. *Refinado o concentrado*: los minerales de los que se obtienen los metales no ferrosos nunca se encuentran en estado puro y en cantidades comerciales, por lo que se deben separar y preparar. Entre los procesos de preparación más utilizados está el pulverizar al mineral y luego mezclarlo con compuestos que promuevan la formación de espumas en las que los elementos metálicos quedan suspendidos. Posteriormente se retira la espuma y con ella los minerales necesarios para la producción de los metales no ferrosos.
3. *Fusión*: no todos los metales no ferrosos necesitan ser fundidos primero para ser procesados. En los hornos para la producción de los metales no ferrosos siempre existen equipos para el control de las emisiones de polvos, que más que constituir una medida de control de la contaminación ambiental es una necesidad ya que los polvos son valiosos porque tienen el mineral que se está procesando o porque de ellos se pueden obtener otros materiales con un valor representativo.
4. *Afinado*: el aluminio obtenido de las cubas electrolíticas de la alúmina contiene cierta cantidad de impurezas de alúmina, criolita y gases, por lo que para obtener aluminio de alta pureza se somete un proceso de afinación. Existen vías principales para afinar el aluminio: a) Cloración: por este método se insufla cloro a la masa de aluminio fundido a temperatura entre 750-770°C durante un tiempo de 10-15 minutos; durante la insuflación las impurezas reaccionan con el cloro y se separan del aluminio aunque cerca del 1% del aluminio también reacciona y se separa produciendo pérdidas del material. b) Afinación Electrolítica: para afinar el aluminio por el método electrolítico, las barras de aluminio impuro se colocan como ánodos en un baño de sales de cloro y flúor y el aluminio de alta pureza se descarga en cátodos hechos aluminio puro.

Cada una de estas operaciones se da de diferentes maneras en la producción de los metales no ferrosos, de hecho, en algunos casos no se llevan a cabo todas ellas.

Ciertas propiedades físicas y químicas del aluminio están en función de la pureza del mismo, y aunque no existe una nomenclatura aceptada al respecto, se ha sugerido una clasificación en base a porcentajes la cual se muestra en la tabulación 5.4 [77]:

<i>Porcentaje de Aluminio</i>	<i>Asignación</i>
< 99.5	Aleación o chatarra
99.5-99.9	Pureza comercial
99.9-99.99	Pureza alta
> 99.99	Súper-pureza

La resistividad eléctrica a bajas temperaturas es empleada como medida para alta pureza y súper-pureza.

Muchas aplicaciones del aluminio y de sus aleaciones están basadas en sus propiedades de baja densidad, alta conductividad eléctrica y térmica y gran resistencia a la corrosión. Las

aleaciones de aluminio son ligeras, fuertes, y fácilmente moldeables. A continuación se enlistan algunas de las propiedades físicas relevantes del aluminio puro en la tabla 5.5 [77]:

Calor de fusión	397 J/g
Calor de Vaporización	1.08×10^4 J/g
Capacidad Calorífica	0.90 J/g K
Densidad (sólido)	2699 Kg/m ³
Densidad (líquido)	2357 Kg/m ³
Coefficiente de expansión	23×10^{-6} /K a 293 K
Conductividad Térmica	2.37 W/cmK a 298 K
Tensión Superficial	8.68×10^{-3} N/cm a mp
Viscosidad	0.0012 Pa.s a mp

Como material de envase el aluminio ofrece la ventaja de impermeabilidad a la humedad, gases, luz y olores.

5.6.1 Producción de Aluminio

La producción de aluminio actualmente implica dos procesos industriales independientes para la transición desde los minerales de aluminio naturales al metal extraído.

La reducción del óxido de aluminio a aluminio incluye dos etapas principales [80]:

a) Producción de un óxido de aluminio (alúmina) de minerales de aluminio.

La materia prima principal en este proceso es la Bauxita, término que es utilizado para hacer referencia a rocas sedimentarias que contienen cantidades recuperables de minerales de aluminio como gibbsita, boehmita y diásporo. Es un residuo producido por la meteorización de las rocas ígneas en condiciones geomorfológicas y climáticas favorables. El nombre se deriva de Les Baux, Provenza, Francia donde fue descubierta por el geólogo Pierre Berthier en 1821.

La alúmina producida comercialmente a partir de Bauxita es obtenida por un proceso patentado por Karl Bayer en 1888. Este proceso involucra un lixiviado caustico de la bauxita a temperatura y presión elevada seguido por una separación de la solución resultante de aluminato de sodio y una precipitación selectiva del aluminio como Óxido de Aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

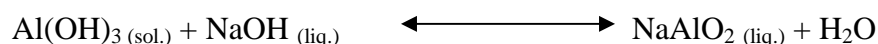
Las condiciones de proceso como temperatura de lixiviado, tiempo, y concentración caustica, así como los costos se encuentran en función del tipo de bauxita a ser procesada. Por lo tanto, una planta de proceso Bayer es diseñada para tratar un tipo de bauxita

específica y no puede ser utilizada para una diferente sin la necesidad de modificaciones de planta.

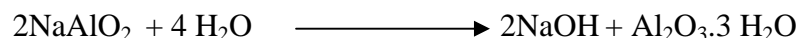
El proceso se inicia con una mezcla de bauxita cruda con solución de lixiviado precalentada, durante este primer paso es adicionado CaO para controlar el contenido de fósforo y para incrementar la solubilidad de la alúmina. El contenido de sólidos del producto resultante es 40%-50% el cual es bombeado con solución adicional de lixiviado hacia los digestores presurizados donde es utilizado vapor a alta presión para elevar la temperatura. La alúmina es disuelta en este paso, se forma aluminato de sodio soluble y el complejo de silicato de sodio y aluminio es precipitado.

El esquema del proceso Bayer consiste en varias operaciones. La Bauxita procedente de las minas es secada y progresivamente aplastada, para entonces ser colocado dentro de una autoclave con solución de NaOH a 230 ° C y presiones superiores a la atmosférica. La digestión toma hasta 5 horas dentro de tanques de 10ft-15ft de diámetro y altura de 90 ft con un rango de temperaturas de 140°C-323°C y con presiones entre 60psi-1000psi. El rango de temperatura más bajo es usado para bauxitas en las cuales casi toda la alúmina disponible está presente como gibsita (Hidróxido de Aluminio, Al(OH)₃). El rango de temperatura más alto es necesario para la digestión de bauxita con alto porcentaje de Boehmite (AlO(OH)). La concentración caustica de la solución de lixiviado expresada en gramos por litro de Carbonato de sodio (Na₂CO₃) es 200 g/lit. para bauxita de gibsita y 300 g/lit. para bauxitas con alto contenido de boehmite.

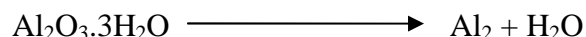
La digestión de la bauxita a altas temperaturas con sosa caústica en la cual se disuelve alúmina eliminando como residuos óxido de hierro y silicatos (lodos rojos) es realizada a través de la siguiente reacción química:



La solución resultante de aluminato de sodio y lodos rojos insolubles procedente de los digestores son enfriados y la arena gruesa es eliminada por separadores gravitatorios o ciclones húmedos. Los sólidos finos son separados por decantación en tanques de 15 ft de profundidad y 50-125 ft de diámetro.



El aluminato de sodio clarificado es enfriado hasta llegar a la sobresaturación y después es mezclado con finos cristales de alúmina trihidratada. La alúmina es precipitada como trihidrato y separado por sedimentación o filtración para posteriormente ser lavado. La solución de lixiviado es regenerada en el paso de precipitación y junto con la alúmina restante en solución es reciclada hacia los digestores. La alúmina filtrada y lavada es calcinada para fabricación de metales.



Los lodos rojos contienen Fe_2O_3 , TiO_2 , alúmino-silicato de sodio y pequeñas cantidades de otros óxidos. Para contrarrestar las pérdidas tanto de NaOH como de alúmina es adicionado un reactivo con bajo contenido de sílice.

Invariablemente la alúmina preparada a través del proceso Bayer tiene pequeñas cantidades de impurezas asociadas con niveles típicos resumidos en la tabla 5.6:

<i>Impureza</i>	<i>% de impureza Secado de alúmina trihidratada</i>	<i>% Alúmina calcinada</i>
SiO_2	0.020	0.03
Fe_2O_3	0.015	0.02
Na_2O	0.250	0.50
CaO	0.030	0.05
Pérdida en ignición	34.70	0.80
Humedad	0.400	-

Existen variaciones en los niveles de impurezas dependiendo del tipo de mineral, pero con los valores promedio mostrados para el proceso Bayer se consigue una alta calidad de alúmina; aunque existe un método para procesamiento de bauxita de alta calidad en el cual el aluminato de sodio (NaAlO_2) junto con óxido de calcio (CaO) son utilizados para la reconstitución de Hidróxido de Sodio (NaOH).

Además de las reacciones antes indicadas en proceso Bayer, el óxido de calcio (CaO) es utilizado para reaccionar con los silicatos que ese encuentra en la bauxita, y el carbonato de Sodio (Na_2CO_3) se emplea para regular el pH.

- b) Producción de Aluminio a partir de un óxido de aluminio por electrólisis con fluoruro de Sodio- aluminio fundido (Na_3AlF_6) (criolita).

El procedimiento de fabricación de Aluminio por electrólisis de Al_2O_3 disuelto en la criolita, ideado por Héroult y Hall en 1886 es, a pesar de la existencia de otros, el único procedimiento de carácter industrial debido a que los demás sólo han llegado a escala semi-industrial [81].

La alúmina proveniente del proceso Bayer tiene un punto de fusión superior a los 2000°C , por lo que la mezcla con la criolita se consigue bajar el punto de fusión a 900°C aproximadamente (mezcla eutéctica).

Este proceso requiere de una cantidad de energía eléctrica intensa. El promedio actual estadounidense respecto al consumo de energía durante la reducción es estimado en 15.18 kWh/Kg Al , aunque se ha conseguido obtener un valor mínimo de 13.0 kWh/Kg Al en

líneas modernas con celdas de reducción de alto amperaje. Estas celdas de producción tienen eficiencias promedio entre 85%-95%

Para poder producir 1 tonelada de aluminio se requieren las siguientes cantidades de materia prima y energía (Tabla 5.7) [79]:

Bauxita	4385.63 Kg.
Coque (carbón de piedra o bituminoso coquizado)	510.31 Kg.
Carbonato de sodio anhidro (Na ₂ CO ₃)	483.29 Kg.
CaO	119.07 Kg.

5.7 Reciclaje de Aluminio

En el caso de las latas de aluminio para bebidas, si el proceso de reciclaje es el correcto, con el aluminio que contiene una lata vacía se puede fabricar una nueva. El éxito con el reciclaje de las latas de aluminio se debe, principalmente, al valor agregado de las mismas. En efecto, la energía utilizada en el reciclaje de este metal corresponde al 5% de la que se necesita para la producción de aluminio a partir de la materia prima mineral (bauxita).

En el proceso de reciclaje de este material las latas recolectadas son enviadas a fundición para ser convertidas en lingotes y posteriormente en láminas.

En la tabla 5.8 se especifican los ahorros logrados a través del reciclaje de una tonelada de aluminio entendiéndose como “lodos rojos” aquellos generados en el proceso de fabricación de aluminio que contaminan el agua y suelo con óxidos y silicatos.

<i>Componentes</i>	<i>Cantidad</i>
Materias primas	4 Toneladas de Bauxita
Agua	91200 litros
Energía	14,630 kw/hrs.
Desechos Sólidos	349.74 Kg
Otros Residuos	1,646 Kg. Lodos rojos.

Fuente: González A., 2001.

El reciclaje de Aluminio conduce a los siguientes ahorros: 95% del consumo de agua, 95% del consumo de energía y 95% de contaminantes atmosféricos.

El ahorro en energía eléctrica queda detallado en la tabla 5.9 [82]:

Tabla 5.9 Consumo de Energía Eléctrica para la producción de aluminio.	
<i>Metal Primario</i>	<i>Metal Secundario</i>
Alúmina	Chatarra
Planta de Reducción	Horno de Fundición secundario
Metal primario	Metal secundario
15.18 kWh/Kg	0.8 kWh/Kg

El ahorro conseguido en energía eléctrica a través del reciclaje del aluminio oscila entre 14.6-14.7 kWh/Kg.

Los ahorros energéticos y en emisiones atmosféricas de cada uno de los materiales a través del reciclaje serán analizados desde el punto de vista exergético en el capítulo de resultados.

CAPÍTULO 6

MERCADO DE LOS ENVASES

6.1 Introducción

Como se ha mencionado ya en el capítulo anterior, los envases son utilizados ampliamente en las industrias de alimentos y bebidas, salud, cosméticos y otros sectores, convirtiéndose en artículos esenciales acompañados de una participación económica relevante y constante. Lo anterior se visualiza a través de la figura 6.1 en la que describe la participación económica de la industria del envase en los últimos años [83]:

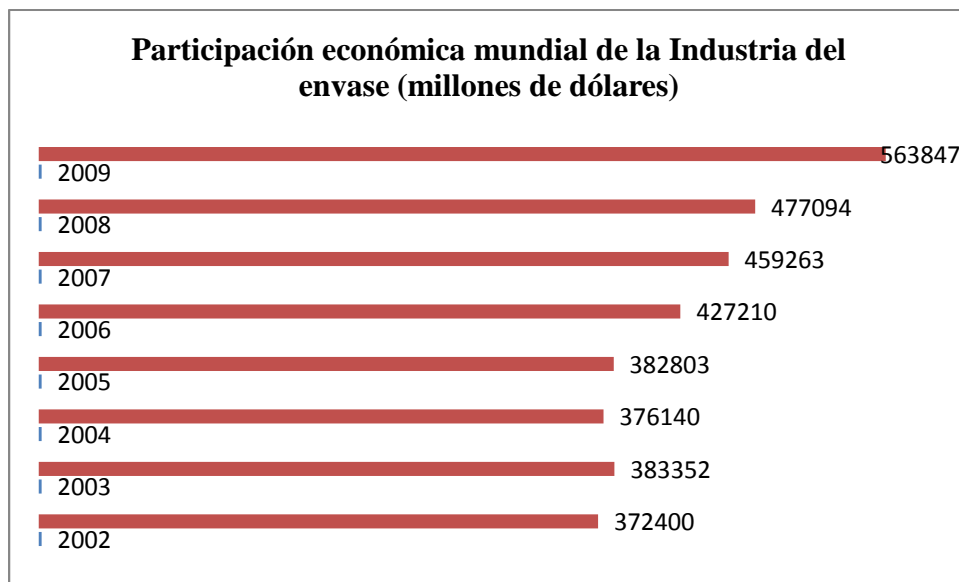


Figura 6.1 Participación económica mundial de la industria del envase.
Fuente: World Packaging Organization (WPO).

Como puede observarse, ha habido un crecimiento sostenido de este negocio aproximadamente de 5% anual.

Por otra parte, el aumento en la producción y consumo de envases ha generado una presión menguante respecto a la capacidad de los rellenos de sanitarios y los efectos ambientales, por lo que, los incentivos económicos y el apoyo político contribuyen a la tendencia hacia el aumento del reciclaje. Así, para que en un país un programa de reciclaje resulte satisfactorio, es necesaria la existencia de un mercado confiable y cercano para los materiales recuperados.

El desarrollo de mercados para el reciclaje depende de la calidad de los materiales, la capacidad global de la industria y el costo de materias primas en competencia. La contaminación del material recuperado o los cambios en su composición química debidos a los procesos de recuperación, significan que estos productos por lo general son de calidad

inferior y, por lo tanto, de menor precio que los materiales vírgenes, como se verá más adelante para el caso de México.

Además de mercados confiables, los programas de reciclaje requieren una infraestructura de recolección y procesamiento que permita la disponibilidad de un abasto confiable y consistente de material recuperado para los fabricantes. Los productos que se recuperan de los Residuos Sólidos Urbanos se pueden utilizar como “recursos o materias primas” sólo cuando existe un mercado para ellos.

Un aspecto importante a considerar en la disposición de estos residuos es el costo neto de la recolección en los lugares públicos, el cual se ha estimado en un costo promedio representativo de 100 dólares/tonelada (en Estados Unidos) para la recolección, acarreo y entierro. Si el 25% del flujo de Residuos Sólidos Urbanos se recicla, la incorporación de un programa de reciclaje aumentaría el costo total del sistema a 120 dólares/tonelada [7].

Enseguida se proporciona información de los tres tipos de envases tratados en este trabajo con lo cual se pretende particularizar el escenario de cada uno de ellos.

6.2 Envases Plásticos y botellas de PET

El país líder en el mercado de envases plásticos es Estados Unidos con una producción igual a 20,091 millones de dólares seguido por Japón con 5,607 millones de dólares, ambos durante 2009. En la gráfica 6.2 se encuentra la participación de los demás países que ocupan una posición importante en el mercado de este tipo de envases [83]:

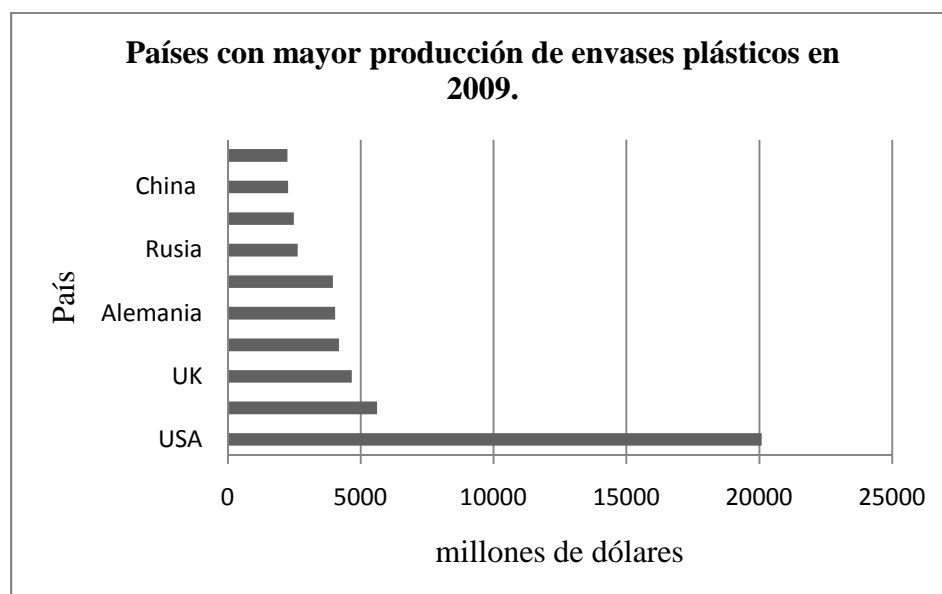


Figura 6.2 Países con mayor producción de envases plásticos en 2009.
Fuente: World Packaging Organization (WPO).

En el caso del PET, el desarrollo y crecimiento del mercado de la resina ha sido impresionante. Después de la introducción de la resina a mediados de la década de los años 70, el consumo global continúa creciendo a más de 8% experimentando un descenso a 3.8% en 2008 debido a la adversa situación económica mundial. Las tres regiones más importantes que representan más del 50% del consumo y la producción son: Estados Unidos, Europa y Asia [70].

El consumo en Asia y el Medio Oriente podrían crecer a un ritmo del 10 % o más para 2012 y además podrían transformarse en las regiones de mayor producción a nivel mundial para los mercados de exportación hacia Europa Oriental, Centro y Oceanía.

De acuerdo a datos generados por SRI Consulting, se tiene la siguiente proyección para el año 2015 en la demanda de botellas de PET a nivel mundial (Tabla 6.1) [70]:

Año	2005	2015
Botellas de PET (toneladas)	8 500 000	22 000 000

La industria del plástico, por lo tanto, estima un incremento en la demanda de botellas de PET a nivel mundial equivalente a más del doble respecto al valor registrado durante el año 2005, lo cual confirma el crecimiento vertiginoso de esta industria, es decir, el mercado crecerá a una tasa media anual de crecimiento de 9.97%.

Por otra parte, en relación al consumo nacional de este material, se presenta la tabla 6.2 con datos comprendidos durante el periodo 2004-2009 de acuerdo a datos proporcionados por el Centro Empresarial del Plástico [84]:

Año	Toneladas	Toneladas en botella	% en botellas
2004	675,000	229,500	34
2005	690,000	241,500	35
2006	738,000	265,000	36
2007	780,000	296,000	38
2008	800,000	336,000	42
2009	816,000	375,360	46
Promedio	749,833	290,560	38.5

Fuente: Centro Empresarial del Plástico.

Conforme a los datos anteriores, del total de toneladas de PET producidas en México, aproximadamente el 38.5% es consumido en forma de botellas, este porcentaje constituye una amplia participación de las botellas como material de envasado respecto a la producción nacional de esta resina. La tasa media anual de crecimiento entre 2004-2009 es de 10.34%.

Sólo para efectos comparativos, utilizando la definición de unidad funcional para conocer el número de botellas producidas en 2009 de cualquier volumen sería de 9,759.4 millones de botellas/año; esto querría decir que se estarían consumiendo entre 81-163 botellas/habitante/año.

Las cifras de importación y exportación muestran, por otra parte, un comportamiento de sobre-oferta en el mercado de PET como puede observarse a continuación en la tabla 6.3 [84]:

Tabla 6.3 Importación y Exportación de PET en México.		
<i>Año</i>	<i>Importación (Toneladas)</i>	<i>Exportación (Toneladas)</i>
2003	140,360	224,535
2004	71,320	366,030
2005	72,062	450,464
2006	140,570	361,121
2007	77,564	369,173

Como se puede apreciar, las importaciones han tenido un comportamiento a la baja mientras que la tendencia de las exportaciones es contraria, lo que quiere decir que existe una sobreoferta y que todo lo que se produjo no fue consumido.

Cabe mencionar que el mercado aún no competido por el PET, es el envase de cerveza, aunque el uso de este material en estas botellas está ganado adeptos en ciertas regiones en desarrollo como Rusia, India y China. A nivel mundial, los envases de PET para cerveza son apenas de 5% del total, aproximadamente y se espera que este nicho de Mercado crezca en Europa Occidental, principalmente en Alemania. Si se consigue materializar este escenario, el crecimiento del consumo de PET sobrepasaría el 10% [70].

6.2.1 Reciclaje de PET

La principal problemática en el reciclaje de PET se debe principalmente a que la ventaja que ofrece el envase de PET en cuanto a su baja densidad, representa una desventaja para la logística del reciclaje debido a que se originan altos costos de transporte y manejo [7], motivo por el cual el negocio del reciclaje depende en gran medida de este aspecto.

Actualmente existen 4.9 millones de toneladas de PET a nivel mundial que se pueden reciclar, dato que verifica nuevamente que sólo el 25% del PET producido es reciclado, conforme a la tabla 6.1. Esta tendencia se irá incrementando debida, principalmente, a que el PET reciclado es 70% más económico que el virgen [70].

De acuerdo a datos reportados por el Inventario del Distrito Federal, en esta Ciudad se reportó un acopio para fines de reciclaje de una cantidad de 26,160 toneladas de botellas de PET durante el 2008 [85], que de acuerdo a la tabla 6.2, representan el 12.8% del consumo total en el mismo año en todo el país.

Para fines de esta tesis, se ha supuesto que siendo la tasa media anual de crecimiento de 10%, el mercado de botellas de PET podría llegar a 1'295,845 toneladas en 2022. De acuerdo a lo anterior, también se ha supuesto que el mercado de reciclaje de PET sería del 10% de la demanda futura de PET virgen, gracias a la construcción de una planta de reciclaje.

6.3 Botellas de vidrio

En los últimos años el envase de vidrio ha perdido participación en el mercado de empaques alimenticios, principalmente a causa del PET; sin embargo, como se ha dicho en el apartado de PET, el vidrio continúa siendo el mejor material para la industria cervecera y vitivinícola.

El mercado mundial de envases de vidrio ha mantenido un crecimiento anual de 2.2% desde 1999, estimándose en 30,200 millones de dólares. China constituye el mercado más grande del mundo en envases de vidrio con una participación económica estimada en 7,307 millones de dólares en 2009 seguido del mercado estadounidense con 4,130 millones de dólares durante el mismo año. En la gráfica 6.3 se muestra la producción de envases de vidrio (en millones de dólares) de los países con mayor participación en el mercado de botellas de vidrio [83]:

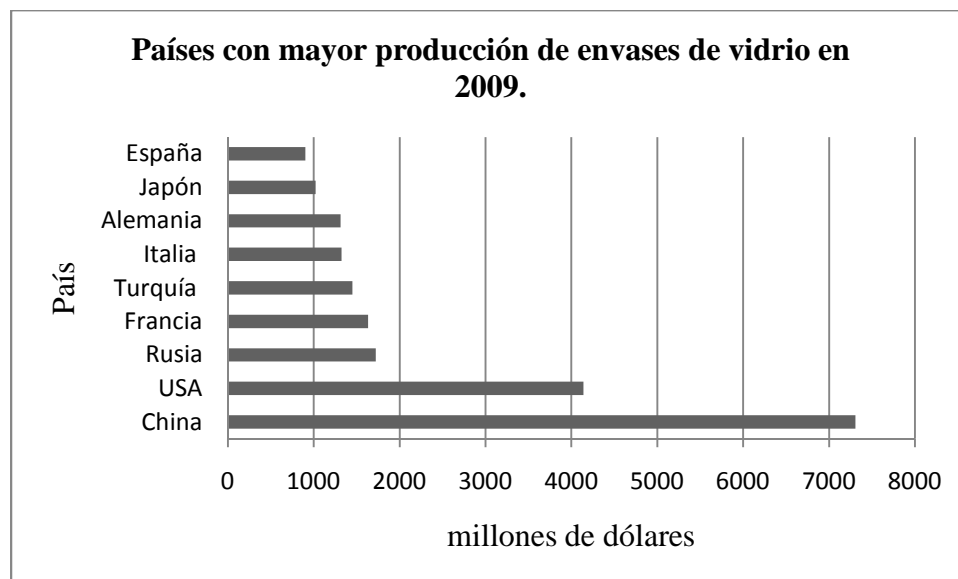


Figura 6.3 Países con mayor producción de envases de vidrio en 2009.

Fuente: World Packaging Organization (WPO).

A nivel internacional surgieron transformaciones importantes en la estructura de esta industria entre 1980 y 1990, proceso que vivió con intensidad Estados Unidos debido a las alianzas estratégicas de diferentes corporaciones para hacer la frente a la competencia ante los materiales sustitutos (plástico y metal).

México ha mantenido una de las principales posiciones entre los países proveedores de envases de vidrio a Estados Unidos con un promedio de 10% del total de las importaciones de este país, ubicándose en segundo lugar por debajo de China. Además de Estados Unidos, México exporta principalmente a Canadá, Centroamérica, y Sudamérica, en ese orden de importancia [86].

A diferencia del comportamiento mundial, la industria del vidrio en México ha mantenido un crecimiento sostenido desde 1994 a pesar del desarrollo de materiales sustitutos. De acuerdo a información manejada por el productor líder en México, Grupo Vitro, en el 2002 se fabricaron 9 mil millones de piezas de envases representando un crecimiento del 9% [87]. Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), la producción general de vidrio ha experimentado un crecimiento sostenido del 37%. Los envases y ampollitas representan un 50% de la producción total de vidrio [88].

6.3.1 Reciclaje de vidrio

Puesto que el vidrio triturado reciclado funde a una temperatura menor que las materias primas que se utilizan para producirlo, el uso de más vidrio de desecho en la manufactura de vidrio permite ahorros de energía para el fabricante (por cada 10% de aumento en la proporción de vidrio de desecho se consigue una reducción de 2% en el consumo de energía [7]). Por lo general, los recipientes del vidrio incluyen alrededor de 50% de vidrio de segunda mano, el cual se puede reciclar indefinidamente.

En España, el vidrio es el material que más se recicla, en 2006 alcanzó un 51% de la tasa nacional de reciclaje, muy cerca del objetivo del 60% establecido por la Unión Europea para el año 2008 [89]. Como se vio en el capítulo dos, de acuerdo a datos de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), en México se recicla un 34.7% del vidrio de desecho lo cual equivale a 819,475 toneladas/año [26].

6.4 Latas de Aluminio

De manera similar que para los envases de vidrio, a continuación se presenta una gráfica donde se muestra la producción de envases de aluminio de los principales países en este mercado [83]. Como se puede observar, para el caso de latas de aluminio, el país líder es Estados Unidos, seguido por Japón y China (Figura 6.4):

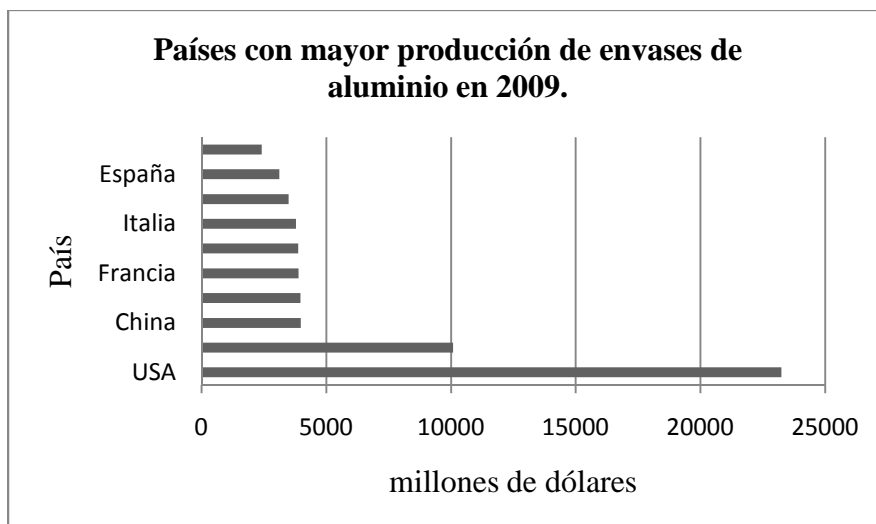


Figura 6.4 Países con mayor producción de envases de aluminio en 2009.
Fuente: World Packaging Organization (WPO).

En 2006 el uso promedio per cápita en el mundo es de 20 kilogramos, sin embargo, este dato varía ampliamente de país a país. En la Unión Europea el consumo per cápita es de 25 kilogramos, mientras que en Estados Unidos y Japón es de 33 kilogramos [90].

El mercado mundial de Aluminio registró un superávit de 1.07 millones de toneladas en el 2008, lo que representa un fuerte incremento respecto del excedente de 178,000 toneladas en 2007, según información de la Oficina Mundial del Estadísticas del Metal (WBMS, por sus siglas en inglés). La demanda aumentó a 38.3 millones de toneladas, 324,000 toneladas más que la cifra del 2007, mientras que la producción creció a 39.3 millones de toneladas, lo cual representa un incremento de 1.15 millones de toneladas [62].

En cuanto al precio del Aluminio, éste experimentó una caída del 60% contra el tope de julio del 2008, lo cual provocó que en enero del 2009, se llegara a encontrar hasta en 1,350 dólares/tonelada métrica, el nivel más bajo de la historia. De acuerdo a London Metal Exchange, el precio está por debajo del 40% del costo de su producción y ha bajado debido a la sobreoferta mundial del mismo [62]. Se prevé que la tendencia en los precios del Aluminio siga descendiendo, mientras el mercado se mantenga en una situación de excedentes. El precio del Aluminio no ha subido tanto en comparación con otros metales, dado que China es un exportador neto de Aluminio.

En la tabla 6.4 se proporcionan los valores de las importaciones de aluminio realizadas en nuestro país [62]:

Tabla 6.4 Importaciones mexicanas de lámina de aluminio.			
<i>Importaciones</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>
Año	2006	2007	2008
Total	184,462,794	197,263,303	241,099,515

Fuente: CANAFEM

Los datos de la tabla anterior corresponden a las importaciones de lámina de Aluminio en diferentes dimensiones, medidas y especificaciones. El principal y único país proveedor de este importante insumo para envases de bebidas continúa siendo Estados Unidos.

Las exportaciones de aluminio que se llevan a cabo en México corresponden al material post-consumo en el que se incluyen las latas de bebidas. En la tabla 6.5 se especifican los datos al respecto:

Tabla 6.5 Exportaciones mexicanas de aluminio para reciclar (chatarra de aluminio)			
<i>Importaciones</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>	<i>Cantidad (Kg.)</i>
Año	2006	2007	2008
Total	163,078,752	188,250,769	156,959,046

Fuente: CANAFEM.

La disminución en la cantidad exportada durante 2008 se atribuye a la adversa situación económica a nivel mundial. Sin embargo, este tipo de exportación sigue siendo un sector generador de divisas importante que además contribuye a la disminución del volumen de residuos sólidos en el país.

La fabricación de latas de aluminio en nuestro país a partir de las importaciones anteriores presenta el siguiente comportamiento mostrado en la figura 6.5:

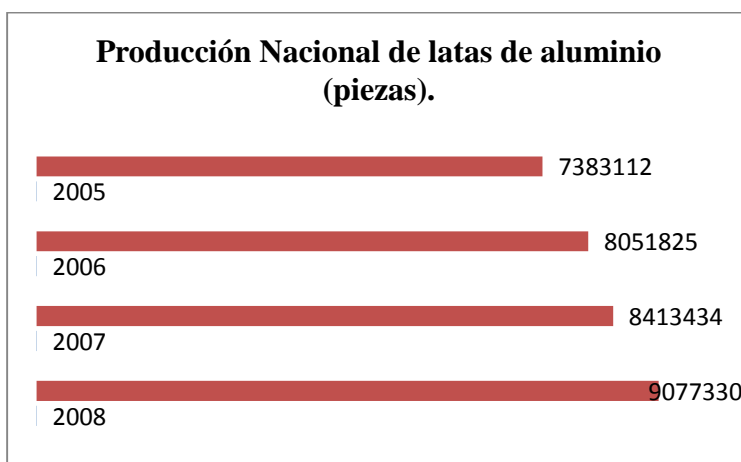


Figura 6.5 Producción Nacional de latas de aluminio en México (piezas).

Fuente: CANAFEM.

Como se puede observar, la producción de latas de aluminio en el país ha experimentado un crecimiento moderado en el periodo comprendido 2005-2008.

6.4.1 Reciclaje de aluminio

Debido al alto costo del mineral de aluminio importado (bauxita) y al desarrollo de infraestructura de procesamiento, el aluminio es la materia prima que se recicla con mayor éxito en el mundo. Tan sólo durante 1990, el 64% de todas las latas de aluminio para bebidas producidas en Estados Unidos fueron recicladas [7].

El reciclaje de latas de aluminio a nivel mundial es de 33%, siendo Suiza el país que más botes de este tipo recicla al superar el 90% de reciclaje [78].

En México se tiene un porcentaje de reciclaje de metales en general del 26%, equivalente a 335,790 toneladas/año, de esta cantidad no se tiene un dato específico de la cantidad correspondiente a aluminio [26].

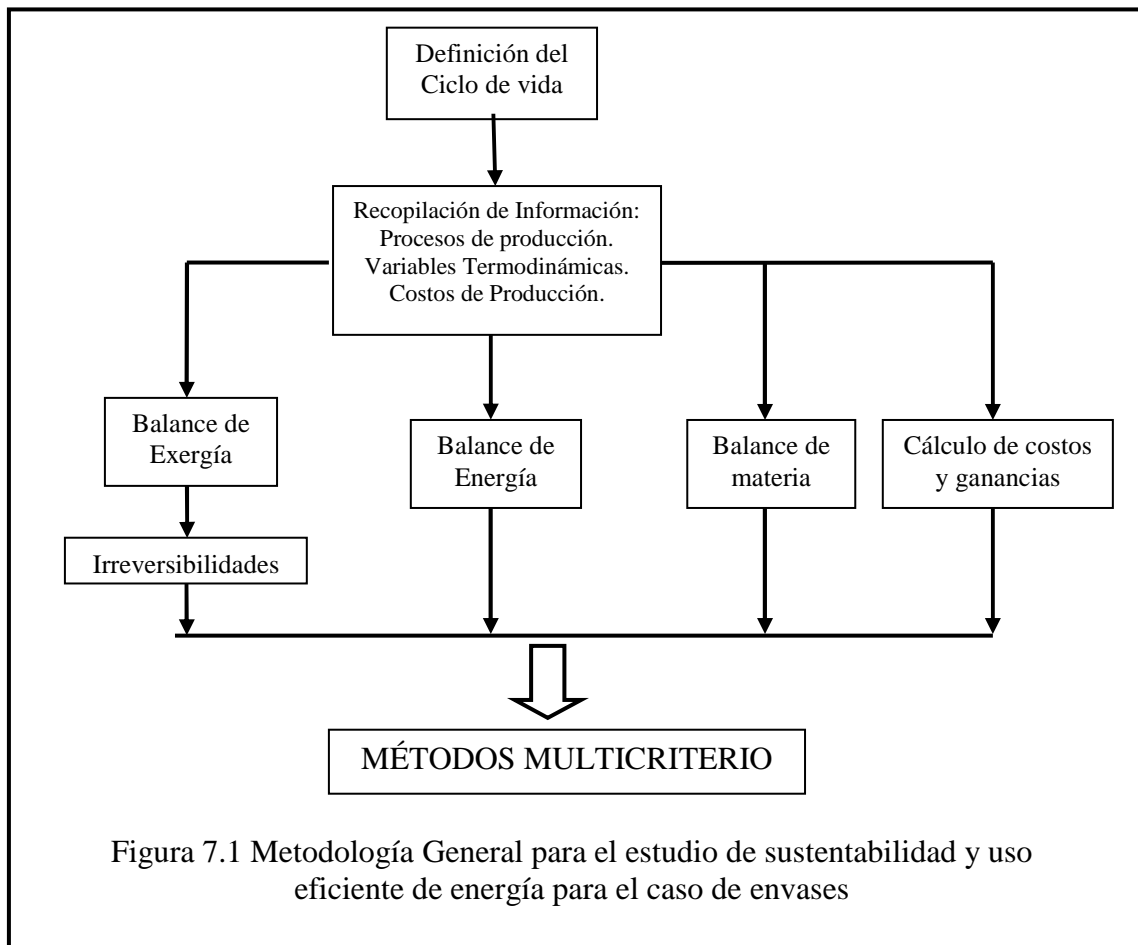
Nota: Los datos económicos de materiales primarios y secundarios así como costos de producción para cada tipo de envase serán desglosados en el capítulo de Metodología y posteriormente analizados en el capítulo de Resultados.

CAPÍTULO 7

METODOLOGÍA

7.1 Metodología General

La metodología que se muestra en la figura 7.1 para el estudio de sustentabilidad con perspectiva en envases fue aplicada a los tres materiales analizados en este trabajo: PET, vidrio y aluminio, de acuerdo a los objetivos e hipótesis planteados para la presente tesis.



Como puede observarse en este esquema general, el método aplicado para el presente trabajo comienza con el concepto de Análisis de Ciclo de Vida tratado en el capítulo 4, el cual sirve como punto de partida para la recopilación de la información requerida. Una vez que se cuenta con todos los datos necesarios de acuerdo a la definición del objetivo y alcance del estudio, es posible realizar los cálculos involucrados para la obtención de los tres balances: materia, energía y exergía (irreversibilidades). Posteriormente, agregando los resultados de un estudio económico, se obtendrán las comparaciones correspondientes

mediante la aplicación de los métodos multicriterio y de esta manera disponer de los elementos suficientes para la toma de decisiones.

La serie de cálculos y tablas presentados en este capítulo, cumplen a detalle la metodología descrita con el propósito de que el lector se percate de los elementos constitutivos que llevarán a los resultados que se encuentran en el capítulo 8.

Es importante mencionar que a lo largo de la metodología descrita y durante la exposición de los resultados, se emplea el término “materiales primarios” para hacer referencia a aquellos materiales obtenidos a partir de las materias primas de origen, mientras que con el término “materiales secundarios” se denomina a aquellos que son producto del reciclaje de los mismos.

7.2 Definición de Unidad Funcional

A pesar de que la definición de una unidad funcional es parte de los análisis de ciclo de vida, a continuación presentamos la definición de una unidad funcional equivalente para los materiales motivo de estudio de la presente tesis, en el entendido que la unidad funcional será aplicada de manera indistinta para la metodología general mostrada en la figura 7.1. Dicha unidad funcional se define como:

“Contener y transportar 26,000 litros de líquido en botellas con un volumen 1 litro”

La cantidad de vidrio y aluminio necesarios para cumplir con la unidad funcional establecida se proporciona a continuación mediante el flujo de referencia (Tabla 7.1):

Tabla 7.1 Flujo de referencia de los materiales en estudio.	
Material	Flujo de referencia (toneladas)
PET	1
Aluminio	2.319
Vidrio	14.84

Fuente: elaboración propia.

La representación física de los materiales citados en la tabla 7.1 puede observarse en la figura 7.2.



Figura 7.2 Representación física de los materiales de envasado bajo estudio.

7.3 Análisis de Ciclo de Vida Exergético

El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta en el estudio exergético permite estimar las *Irreversibilidades* asociadas con un producto a través de:

- La compilación de un inventario de entradas y salidas relevantes de un sistema.
- La evaluación de las irreversibilidades asociadas con estas entradas y salidas.
- La interpretación de los resultados del inventario en relación con los objetivos del estudio.

Esta metodología queda ilustrada en la figura 7.3 a través de la cual es posible visualizar las interacciones entre cada uno de los puntos descritos arriba:

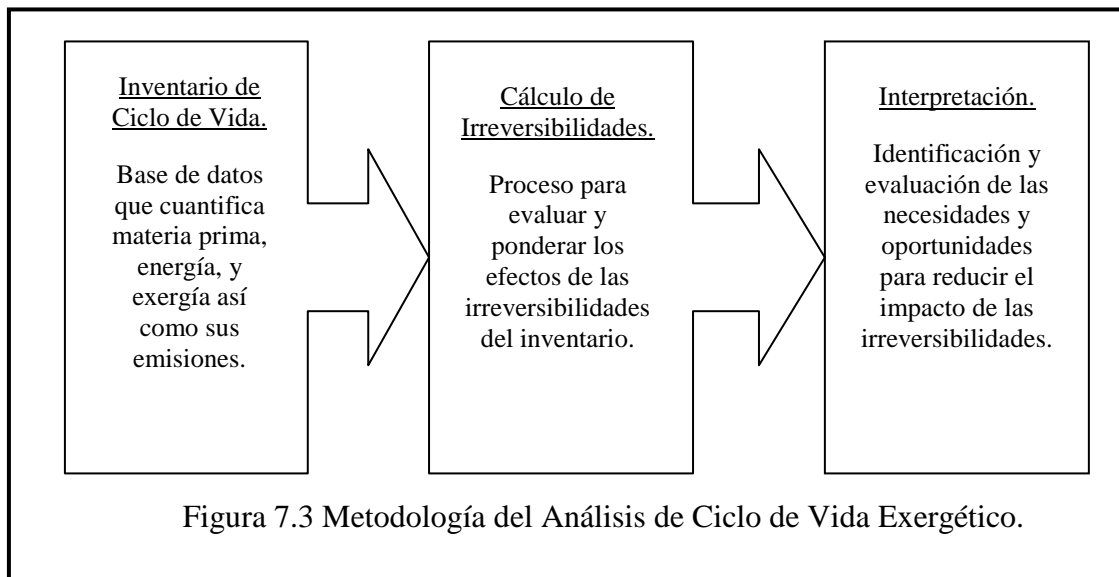


Figura 7.3 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida Exergético.

Los valores de exergía química reportados para cada uno de estos materiales de envasado en función de la unidad funcional son (Tabla 7.2):

Material	Exergía Química (MJ/u.f.)	Referencia
PET	23,705	Calculada (apéndice de cálculos)
Aluminio	76,295	[46]
Vidrio	2,582	[46]

7.4 Balance de Materia

Los datos a los que se hace alusión en los balances de materia y energía corresponden, para el caso del crudo, a la Refinería de Tula Hidalgo, y a la planta de Nuevo PEMEX en lo concerniente al procesamiento de gas natural húmedo (G.N.H).

7.4.1 Obtención de Poli (Tereftalato de Etileno)

Como se ha mencionado en el capítulo 5 y de acuerdo a los límites del sistema mostrado en la figura 7.4, las materias primas principales para la elaboración de Poli (Tereftalato de Etileno) son: ácido tereftálico y etilenglicol.

A su vez, la obtención del Ácido Tereftálico está antecedida por una serie de procesos cuya materia prima de origen es el Petróleo Crudo; por lo tanto, los cálculos comienzan con los procesos de la refinación de petróleo, para lo cual se utilizaron los datos respectivos a una configuración tecnológica de procesos de refinación citada en el apéndice B: *Destilación atmosférica, de vacío, craqueo catalítico y pirólisis para combustibles y Petroquímicos*, cuyo rendimiento total de Petroquímicos asciende aproximadamente a 50% de acuerdo a los siguientes porcentajes de producción (Tabla 7.3):

Producciones	% Peso
Etileno	18.9
Propileno	12.9
Butadieno	3.1
Benceno	5.3
Tolueno	4.3
Xilenos	4.8
Gasolina	8.4
Combustibles	22.6

Fuente: Escobar 2006.

Por medio del esquema 7.4 de bloques se ilustran los límites del sistema que se estudiará para la producción de las botellas de PET primario:

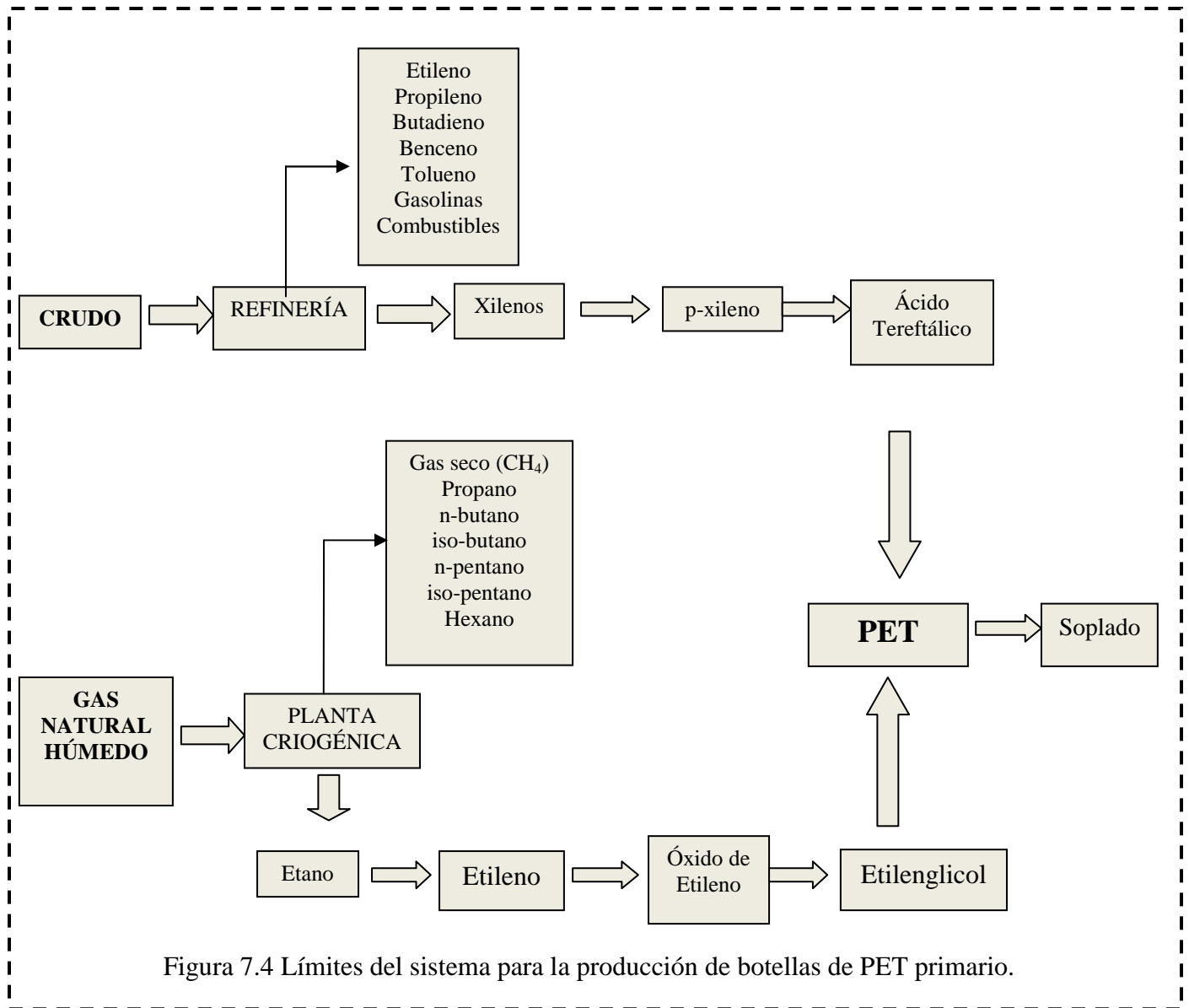


Figura 7.4 Límites del sistema para la producción de botellas de PET primario.

La alimentación a proceso considerada fue de 289.5 miles de barriles/día, o bien, 105,667.5 miles de barriles/año a partir de la cual se obtuvieron los diferentes porcentajes de productos y combustibles antes descritos. Estos datos son reportados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en su Anuario Estadístico 2010 [91]. El apéndice B corresponde al diagrama de la mencionada configuración de refinería.

En el balance de materia y energía fueron utilizados los coeficientes de Insumo-Producto (CIP) reportados en el PEP International Year Book [92]. Dicho coeficiente se define de la siguiente manera:

Coeficiente Insumo-Producto (CIP): relación cuantitativa que expresa la cantidad de insumos (materias primas, otros productos, catalizadores, servicios) que se requieren para generar una unidad de producto útil para la determinación de patrones técnicos que permitan el cálculo directo de insumos para diversos productos.

Los Coeficientes Insumo-Producto reportados corresponden a las condiciones reales del proceso. El PEP proporciona además los datos de producción económica actual para 600 productos químicos, polímeros y productos de refinería, así como de 1,240 procesos utilizados para la fabricación de los mismos. Los datos son procesos secuenciales –en cadena- de las materias primas básicas, productos intermedios y productos finales. Cada proceso incluye: consumo de materias primas, producción, servicios auxiliares, costos de capital y costos de producción.

Por otra parte, para el caso del etilenglicol, la realización de cálculos inició con los datos de la planta criogénica a partir de la cual se produce el etano indispensable. En la tabla 7.4 se especifican los rendimientos promedio de dicho proceso correspondientes a la planta de nuevo PEMEX [91]:

Tabla 7.4 Rendimientos de la planta criogénica de Nuevo PEMEX.		
<i>Alcano</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Cociente de producción</i>
Metano	CH ₄	3620 MMft ³ CH ₄ /4791MMft ³ G.N.H
<i>Alcano</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Barriles /millón de ft³ G.N.H</i>
Etano	C ₂ H ₆	38.39
Propano	C ₃ H ₈	31.88
n-Butano	C ₄ H ₁₀	13.08
iso-Butano	C ₄ H ₁₀	5.32
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	4.28
iso-Pentano	C ₅ H ₁₂	3.61
Hexano	C ₆ H ₁₄	3.34

En la tabla 7.5 son especificados los coeficientes correspondientes al proceso de elaboración de PET teniendo como materias primas etilenglicol y ácido tereftálico [92]:

Tabla 7.5 Valores de CIP para la obtención de PET primario.	
CIP para Ácido Tereftálico	
Coefficiente Insumo-Producto	Unidades
0.86748	Ton. Ácido Tereftálico/Ton. PET
0.70785	Ton. p-xileno/Ton. Ácido Tereftálico
1.29538	Ton. Xilenos/Ton. p-xileno
CIP para Etilenglicol	
Coefficiente Insumo-Producto	Unidades
0.33846	Ton. Etilenglicol/Ton. PET
0.7493	Ton. Óxido de etileno/Ton Etilenglicol
0.8812	Ton. Etileno/Ton. Óxido de etileno
1.2342	Ton. Etano/Ton. etileno

Una vez que se cuenta con la información necesaria para la producción de la resina, se tienen los siguientes datos para la fabricación de las botellas, los cuales también fueron tomados de los reportes del PEP International Year Book y que corresponden al proceso de soplado [92]:

Tabla 7.6 Requerimientos para la fabricación de botellas de PET de 1 litro		
Materia Prima	Consumo	Unidades
PET (Pellets)	0.000029	Ton. / botella
Servicios Auxiliares		
Agua de Enfriamiento	130	m ³
Electricidad	1300	kWh

7.4.2 Reciclaje del PET

En el proceso de reciclaje de PET se consideraron los siguientes Coeficientes Insumo-Producto así como los servicios auxiliares descritos a continuación [92]:

Tabla 7.7 Requerimientos en la elaboración de PET secundario.		
Componente	CIP	Unidades
PET	1.00308	Ton/Ton. producto
Etilenglicol	0.01304	Ton/Ton. producto
Sub-productos	CIP	Unidades
Etilenglicol	-0.0142	Ton/Ton. producto
Servicios Auxiliares	Cantidad	Unidades
Agua de enfriamiento	12	m ³
Electricidad	101	kWh
Gas Natural	199	MM cal

7.5 Balance de energía

Para la realización del balance energético se utilizaron los datos reportados por PEMEX con los respectivos procesamientos. En la tabla 7.8 son especificados dichos datos [93]:

Tabla 7.8 Consumo total de energía en refinería y planta criogénica.		
	Consumo total de energía (G cal/año)	Procesamiento/año
Refinería	11'714,489	105,667.5 miles de barriles
Planta Criogénica	8'429,074	240,170 millones de ft ³

Una vez conocidos los requerimientos de petróleo crudo y gas natural como materias primas de origen, el equivalente en barriles de petróleo crudo es obtenida mediante:

$$1bpce = 5960 MJ \dots \dots \dots ec. 7.1$$

bpce: barriles de petróleo crudo equivalente.

La energía consumida en cada una de las etapas posteriores a la refinería y planta criogénica fue calculada a partir de datos proporcionados en PEP [92].

7.6 Balance de exergía

7.6.1 Cálculo de exergía para botellas de PET

Para el cálculo de exergías químicas estándar de hidrocarburos y petroquímicos se consideró la definición de Szargut y Styrylska [44] quienes asumen una relación entre la exergía química estándar y el poder calorífico neto (PCN) de acuerdo a la siguiente relación proporcionada ya en el capítulo 3:

$$\varphi = \frac{e_{ch}^0}{(PCN)^0} \dots \dots \dots ec. 7.2$$

Para lo cual el factor φ se calcula en función de la composición de C, H, O, N, y S, a través de:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C} \right) + 0.0428 \frac{N}{C} \dots ec. 7.3$$

Donde, H: fracción masa de Hidrógeno, O: fracción masa de Oxígeno, C: fracción masa de Carbono, S: fracción masa de Azufre, N: fracción masa de Nitrógeno.

A su vez, el PCN se conoce mediante la ecuación:

$$PCN = 34.8C + 93.8H + 10.46S + 6.28N - 10.8O \left[\frac{MJ}{Kg} \right] \dots \dots \dots ec. 7.4$$

La variación máxima en los valores de exergías químicas de hidrocarburos a través de la ecuación 7.2 corresponde al metano (CH₄) 1.32%, aún para las temperaturas extremas de la tierra (-40°C-50°C). Esta desviación disminuye para hidrocarburos mayores, por lo tanto, la aplicación de esta ecuación proporcionará resultados confiables.

Las exergías químicas estándar conocidas de algunas sustancias se muestran enseguida en la tabulación 7.9 que contiene los valores de las exergías para hidrocarburos y especies petroquímicas utilizadas en el balance exergético para la elaboración de PET. Esta información fue tomada de los trabajos dirigidos por Rivero R. [44]:

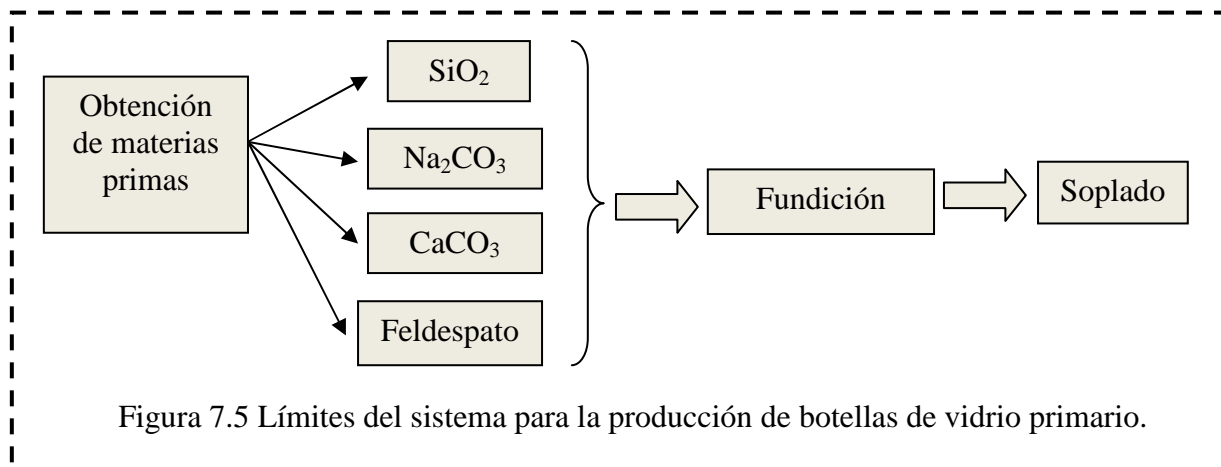
Tabla 7.9 Exergía química estándar de hidrocarburos y petroquímicos			
Especie	Poder Calorífico neto (PCN) (KJ/Kg)	Exergía Química Estándar (KJeq/Kg)	φ
Etileno	47,228.80	48,520.60	1.0274
Propileno	45,411.67	48,549.62	1.0691
Óxido de Etileno	27,706.57	29,156.45	1.0523
Benceno	40,189.71	42,292.03	1.0523
Tolueno	40,574.00	43,231.16	1.0582
(o-m-p) xileno	40,860.47	43,238.55	1.0582
Metano	50,011.84	52,144.99	1.0426
Etano	47,577.64	50,031.93	1.0516
Propano	46,398.43	49,058.60	1.0573
Butano	45,783.61	48,262.22	1.0541
Pentano	45,408.63	48,194.63	1.0614
Hexano	45,164.83	47,747.53	1.0572
Heptano	44,984.53	47,768.42	1.0619
Gasolina	43,497.67	46,650.00	1.0725
Diesel	41,868.00	45,650.00	1.0903
Combustóleo	40,122.10	43,800.00	1.0917
Crudo Maya	41,671.36	44,210.00	1.0609

Fuente: Hernández, 2006.

En el balance de exergía, al igual que en el caso de los balances de materia y energía, se aplican los Coeficientes Insumo/Producto (CIP) reportados [92].

7.7 Botellas de Vidrio

De acuerdo a la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ver capítulo 4), es necesario definir los límites del sistema, por lo que la figura 7.5 los indica para el caso de la producción de botellas de vidrio primario.



7.7.1 Balance de materia

Los siguientes datos hallados en la literatura constituyen la base para los cálculos referentes al balance de materia de las botellas de vidrio [31].

Materia prima	Fórmula	Cantidad (Kg./Ton. vidrio)
Sílice (arena)	SiO ₂	700
Carbonato de Calcio	CaCO ₃	280
Carbonato de Sodio	Na ₂ CO ₃	230
Feldespato	Al ₆ (Si ₂ O ₅) ₃	75.75

7.6.2 Balance de energía

En lo referente a los requerimientos energéticos involucrados en la obtención de las materias primas y la fabricación del vidrio se tiene la siguiente información mostrada en las tablas 7.11 y 7.12.

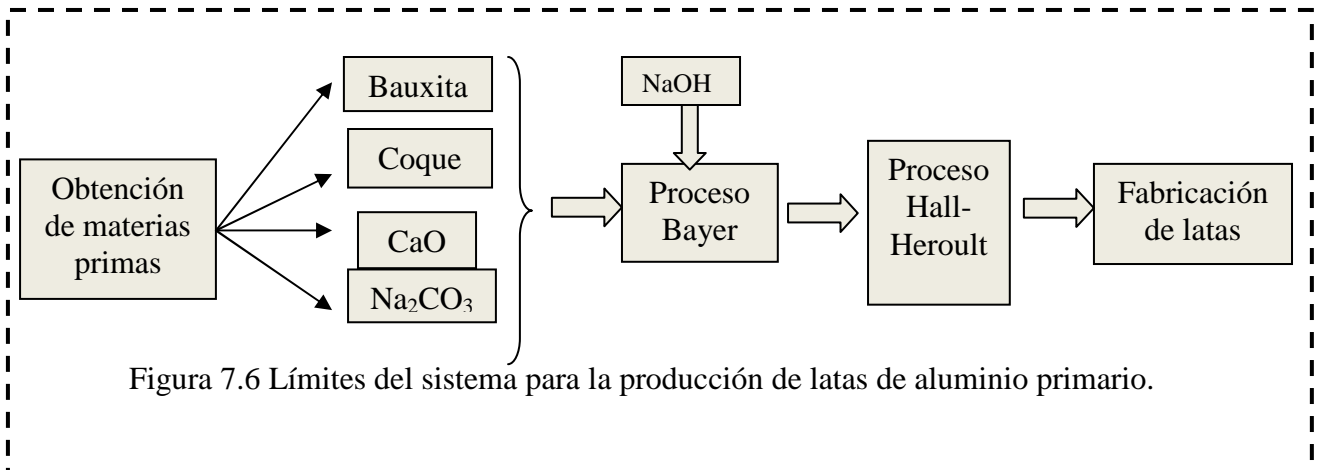
Materia prima	Valor (MJ/Kg)	Referencia
SiO ₂	0.79	[94]
Na ₂ CO ₃	5.05	[95]
CaCO ₃	0.09	[94]
Feldespato	1.83	[94]

Tabla 7.12 Requerimientos energéticos en los procesos de producción de botellas de vidrio primario.		
Proceso	Valor (MJ/Kg)	Referencia
Fundición	3.312	[77]
Soplado	1.2	[77]

7.8 Latas de aluminio

De manera general, en los estudios de metales la producción de éstos a partir de minerales toma en cuenta tres clases amplias de procesos: el primero de ellos es el proceso por medio del cual se realiza la separación del metal de su mineral, el cual es limitado por el cambio en la energía libre de Gibbs asociada con el cambio en la composición química; el segundo proceso es el referente al cambio de concentraciones a través de reacciones, el cual se rige teóricamente por el cambio de entropía asociado, que además en la práctica influyen otros factores como las condiciones reales de operación y la tecnología; el tercer proceso trata sobre el transporte [96]. Como ya se ha especificado en el capítulo 4, los cálculos y resultados de este trabajo no abarcan la etapa de distribución, excluyendo por consiguiente, el tercero de estos procesos.

Por lo tanto, los límites para el estudio del aluminio se encuentran definidos por medio del siguiente diagrama de bloques:



7.8.1 Balance de materia

La cantidad de materias primas necesaria para la producción de 1 tonelada de aluminio es la siguiente [31]:

Tabla 7.13 Materias primas para la producción de aluminio primario.	
Componente	Kg/ton
Bauxita	4,385.63
Coque	510.31
Na ₂ CO ₃	483.29
CaO	119.07

Fuente: SEMARNAT, 2001.

7.8.2 Balance de energía

Los requerimientos energéticos para la producción de aluminio considerados para cada una de las etapas del proceso están basados en los reportes de distintas fuentes, mismos que se especifican a continuación:

Tabla 7.14 Requerimientos energéticos en la obtención de materias primas del aluminio.	
Materia prima	Valor (MJ/Kg)
Bauxita	0.53
Coque	46.49
Na ₂ CO ₃	6.92
CaO	9.95
NaOH	3.24
Alúmina	3.07

Fuente: Boustead, 1997.

Tabla 7.15 Requerimientos energéticos en los procesos de producción de latas de aluminio primario.		
Proceso	Valor (MJ/ton)	Referencia
Reducción	54.648	[80]
Fabricación de latas	0.08	[94]

7.9 Exergía de Minerales

La extracción de materiales a partir de la corteza terrestre implica una reducción neta de la exergía natural, por lo que la tierra se degrada gradualmente. Cuando se extraen estos materiales a partir de sus depósitos y el mineral es separado a través de procesos de molienda y flotación, la concentración del mineral está siendo incrementada artificialmente. En un paso más el mineral es refinado a producto final involucrando generalmente reacciones químicas.

La exergía química estándar para minerales se puede calcular utilizando la expresión:

$$e_{ch} = \sum n_k e_{ch,el k}^0 + \Delta G_{\text{mineral}} \dots \dots \dots ec. 7.7$$

donde:

e_{ch} : es la exergía química estándar del mineral.

$e_{ch,el k}$: es la exergía química estándar del elemento "k".

n_k : es el número de moles del elemento "k" en el mineral.

$\Delta G_{\text{mineral}}$: es la energía libre de Gibbs del mineral.

En el caso de minerales, la experiencia afirma que los requerimientos reales de energía son decenas o incluso miles de veces más grandes que el contenido de exergía del mineral. [97].

El valor exergético del aluminio reportado en la literatura considera las siguientes observaciones [97]:

- La bauxita es el mineral más importante de aluminio y consiste a su vez de oxihidróxidos como: gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), boehmite ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e impurezas como caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), cuarzo o sílice (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), rutilo y anatasa (TiO_2).
- Se consideran despreciables las impurezas contenidas en la bauxita.

Los valores exergéticos del vidrio y aluminio empleados en los cálculos se encuentran reportados por Szargut [46].

7.10 Emisiones Atmosféricas y su exergía

En el cálculo de exergía de emisiones atmosféricas se aplica, al igual que en el caso de los minerales, en la ecuación 7.7 de Szargut [46] para exergías químicas de compuestos, la cual parte la sumatoria de las exergías químicas de los elementos que constituyen al compuesto, multiplicada por el número de moles del elemento, más la energía libre de Gibbs del compuesto.

La tabulación mostrada a continuación contiene los valores de exergías químicas de los elementos constituyentes de los gases de efecto invernadero [47]:

Tabla 7.16 Exergía química de los elementos de contaminantes atmosféricos.		
Elemento	Exergía química estándar (KJ/Kmol)	Exergía química estándar (MJ/Kg)
Carbono	410,260	34.188
Oxígeno	3,970	0.248
Azufre	609,600	19.050
Hidrógeno	236,100	118.050
Nitrógeno	690	0.0246

Dado el concepto de ciclo de vida bajo el cual fue construido el simulador *Sima Pro* (ya descrito en el capítulo 4), el valor reportado corresponde a las emisiones de todos los procesos que integran la producción, por lo que, en los diagramas de balance exergético el valor relacionado a emisiones atmosféricas comprende la totalidad de los bloques de proceso. Las cantidades son reportadas en unidades de mg de gas/Kg. producto.

7.11 Cálculo de Irreversibilidades

Las pérdidas de exergía se expresan considerando al bloque como un par fuente-depósito y donador-receptor, obteniéndolas a partir de la diferencia entre la exergía neta suministrada (e_{nts}) y la exergía neta producida (e_{ntp}). El donador tiene una exergía neta suministrada (e_{nts}), mientras que el receptor tiene una exergía neta producida (e_{ntp}), e “Irr” expresa la irreversibilidad [44]:

$$Irr = e_{nts} - e_{ntp} \dots \dots \dots ec. 7.8$$

Mediante la siguiente figura se ilustra el método de bloques para el cálculo de irreversibilidades en cada proceso:

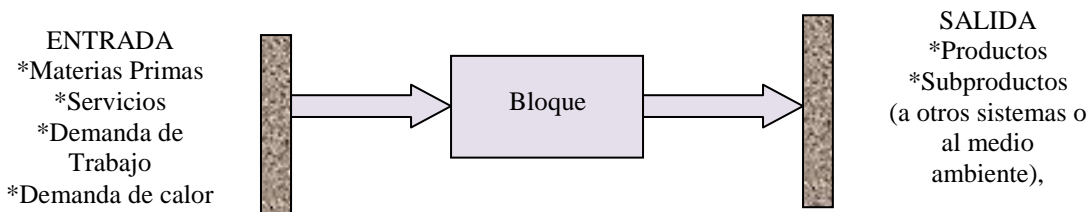


Figura 7.7 Análisis de exergía por bloques.

El donador puede ser el sistema si el flujo de exergía va del sistema al universo y si va en sentido contrario entonces se trata de un receptor. La exergía neta suministrada es el incremento de exergía de entrada menos el de salida que se emplea para obtener el efecto deseado mientras que la exergía neta producida es el efecto deseado del sistema. De esta

manera puede conocerse el valor de las irreversibilidades a partir del valor de exergía de cada corriente.

Así, en cada uno de los procesos que forman parte de la producción de envases, se expresa la entrada de bloque a través del valor exergético correspondiente a la energía y materia primas necesarias para obtención de determinados productos y/o subproductos, mismos que su vez son representados a la salida del bloque a través de su valor de exergía.

El cálculo de eficiencia simple para cada proceso involucrado está dado por la ecuación:

$$\eta = \frac{e_{ntp}}{e_{nts}} * 100 \dots \dots \dots ec. 7.9$$

siendo:

η : eficiencia, e_{ntp} : exergía neta producida, e_{nts} : exergía neta suministrada

7.12 Datos Económicos

Para el estudio económico de los materiales de envasado se emplearon datos provenientes de diversas fuentes industriales entre las cuales se contó con la participación directa del Centro Empresarial del Plásticos [84] y Reciclados de México, ESSA (RECIMEX) [71].

Tabla 7.17 Precios de materiales primarios y secundarios por unidad funcional.				
Material	Precio del material primario (\$/u.f.)	Referencia	Precio del material para reciclaje (\$/u.f.)	Referencia
PET	19320	[71]	4,488	[71]
Vidrio	39,008	[98]	7,361	[100]
Aluminio	58,439	[99]	39,423	[100]

En relación a los costos de producción primaria de cada material se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 7.18 Costos de producción primaria de materiales de envasado por unidad funcional.				
Material	*Costo de producción primaria (\$/u.f.)	Referencia	*Costo de producción secundaria (\$/u.f.)	Referencia
PET	7,800	[84]	2,500	[71]
Vidrio	27,863	[98]	17,554	[89]
Aluminio	41,742	[101]	27,132	[102]

* Los costos a los se hace referencia son únicamente costos variables; los costos fijos, principalmente la depreciación no están incluidos en ninguno de los casos.

Sin embargo, es posible aproximar el monto de la depreciación, si se utiliza como parámetro, el retorno de la inversión mediante:

$$ROI = \frac{Ganancias}{Inversión} = \frac{Ventas - Costos}{Inversión} \dots \dots \dots ec. 7.10$$

El ROI (Return on Investment) representa la rentabilidad que sobre la inversión que se quiera obtener. Aquí se hará la suposición de que esta rentabilidad, es decir, el ROI, es de 25%. Por lo tanto:

El valor de la ganancia considerando depreciación lineal está dado por:

$$Ganancia = V - C - D \dots \dots ec. 7.11$$

Donde:

V: Ventas de producto, C: Costos de producción y D: Depreciación de la inversión.

Se consideró que la depreciación de la inversión es lineal en 10 años.

7.13 Métodos de Análisis Multicriterio

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 contradictorios, 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) [103].

Los beneficios de los métodos Multicriterio, descritos en la literatura, son que estos, son simples, convenientes y de fácil uso, son fáciles de aprender a implementar y proveen un camino eficiente para resolver problemas donde se deben considerar múltiples criterios [103].

Los métodos multicriterio se clasifican en tres grupos [104]:

1. Teoría de la utilidad de múltiples criterios (MAUT, Multi Attribute Utility Theory). Consisten en la agregación de factores desde el punto de vista de una función objetivo, la cual será optimizada. La función objetivo, es el punto principal para el análisis. La suposición que subyace es que las funciones son restrictivas. Sin embargo, si la función de utilidad está disponible para el tomador de decisiones, el problema se reduce a un simple caso de maximización directa de la función objetivo. MAUT, está soportada por paquetes de cómputo, tales como, Analytic Hierarchy Process (AHP).

2. Métodos de sobreclasificación (OM, Outranking Methods). Generalmente, se construyen a través de una relación de sobreclasificación, la cual representa las preferencias del tomador de decisiones. Los OM, suponen que el tomador de decisiones puede, quiere y sabe definir los cambios entre los objetivos, lo anterior implica

que, la no agregación de la función de utilidad puede ser derivada. Los rangos entre los cuales se analizan los criterios, estarán en base a la comparación entre pares de éstos. Los paquetes de cómputo que utilizan este tipo de metodología son: PROMCALC-GAIA, ELECTRE, MACBETH, entre otros. Los OM, operan como funciones escalares entre las posibles alternativas de cada criterio, cuando el tomador de decisiones proporciona pesos a los criterios. El tomador de decisiones analiza con un número dado de parámetros, los cuales establecen las relaciones de sobreclasificación.

3. Métodos interactivos (IM, Interactive Methods)

Es un procedimiento que consiste en fases alternadas de cálculo y discusión. En cada interacción se examina una acción (o grupo de acciones) y el tomador de decisiones incorpora esa información al proceso de solución. La discusión entre las etapas le permite considerar las propuestas del analista y dar información adicional acerca de sus preferencias, que se introducen en el modelo en la siguiente fase del cálculo [105].

La mayoría de los métodos interactivos propuestos se refieren a programas lineales multiobjetivos. Existen formas de comparar estos métodos para utilizar el más adecuado de acuerdo con las condiciones especiales del problema y obtener el mejor resultado.

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 7.19.

Tabla 7.19 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	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	---	$g_j(a_n)$	---	$g_k(a_n)$

Fuente: Brans, 2002.

Las relaciones de dominancia asociadas con un problema multicriterio son:

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

Figura 7.8 Relaciones de dominancia.
Fuente: Brans, 2002.

donde P, I, y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente.

La incomparabilidad se fundamenta cuando una alternativa es mejor que otra en un criterio s , y ésta última es mejor que la primera en un criterio r , entonces es imposible decidir cuál es mejor sin información adicional, ambas alternativas son por lo tanto incomparables. 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 sí existiría una solución óptima.

7.13.1 Metodología PROMETHEE

La metodología PROMETHEE, la cual se aplicará en este trabajo, está basada en comparaciones de pares de alternativas evaluadas en los criterios. 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 [103]:

$$P_j(a, b) = F_j |d_j(a, b)| \dots \dots \dots ec. 7.12$$

donde

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \dots \dots \dots ec. 7.13$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \dots \dots \dots ec. 7.14$$

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 figura 7.9.

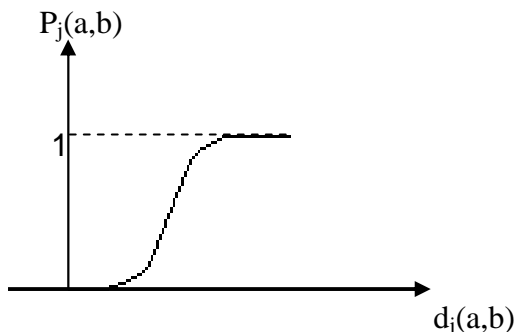


Figura 7.9 Función de preferencia.
Fuente: Brans, 2002.

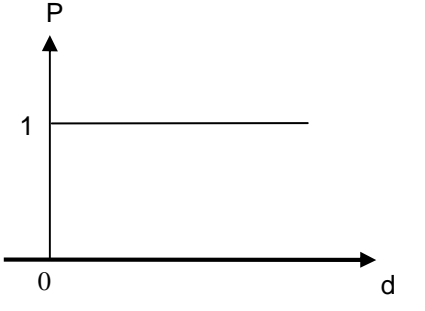
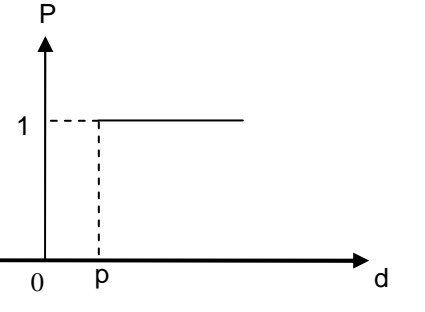
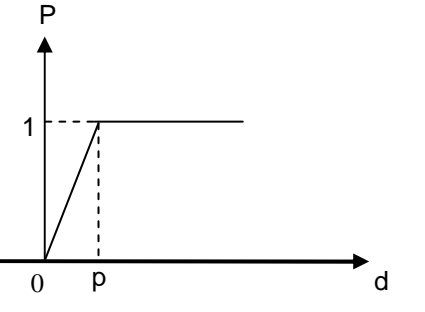
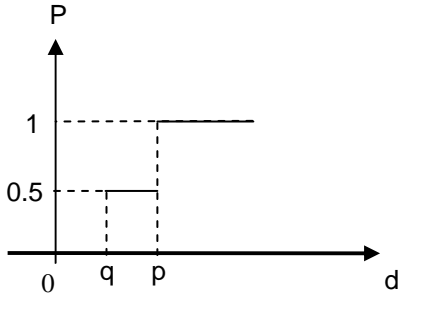
Las preferencias son iguales a cero cuando las desviaciones son negativas. Cuando los criterios deben ser minimizados, la función de preferencia debe invertirse:

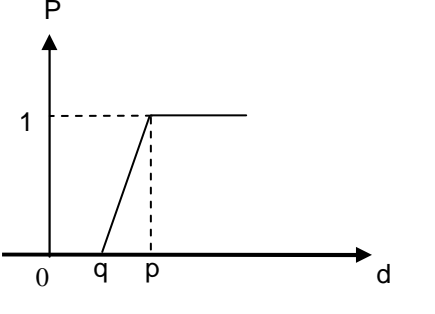
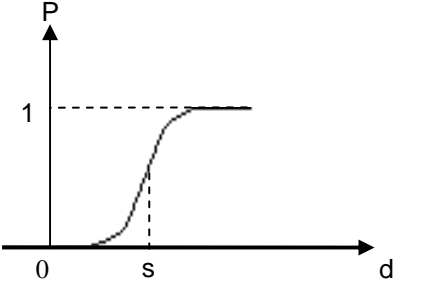
$$P_j(a, b) = F_j|-d_j(a, b)| \dots \dots \dots ec. 7.15$$

Tanto el software PROMCALC, como el software DECISION LAB proponen seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la Tabla 7.20. En cada caso necesitan ser definidos 0, 1 ó 2 parámetros cuyo significado se enuncia a continuación [105]:

- “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 es considerada como suficiente para generar una preferencia amplia.
- s es un 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 7.20 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		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
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

Fuente: Brans, 2002.

Cuando la tabla de evaluación (Tabla 7.19) se haya construido, 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.

7.13.2 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.

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

Figura 7.10 Índices de preferencia de PROMETHEE.

$\pi(a, b)$ 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.

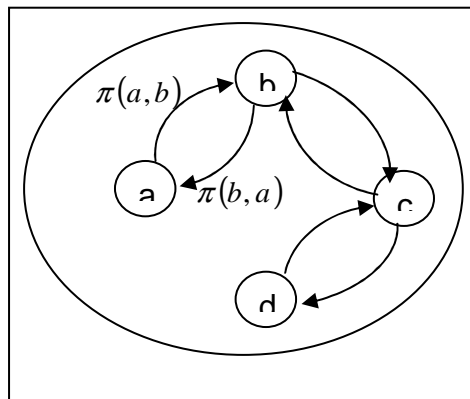


Figura 7.11 Gráfico de índices de preferencias agregadas.
Fuente: Brans, 2002.

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

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \dots \dots \dots ec. 7.16$$

- Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \dots \dots \dots ec. 7.17$$

donde x son todas las alternativas diferentes de a.

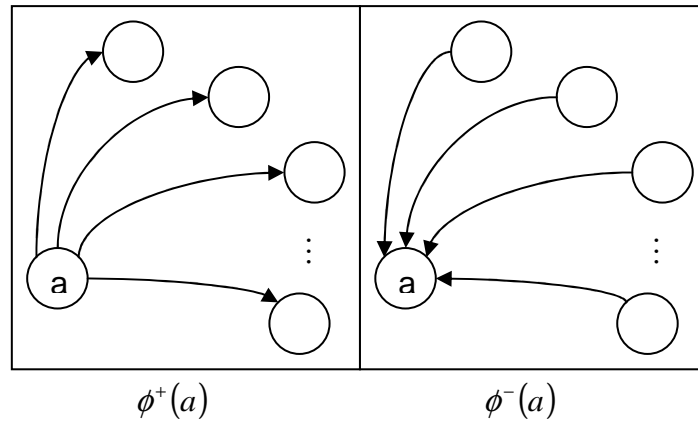


Figura 7.12 Flujos de categorías de PROMETHEE.
Fuente: Brans, 2002.

$\phi^+(a)$ 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 a es de categoría inferior que todas las demás alternativas. Ésta es su debilidad, su carácter de inferioridad.

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:

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

Figura 7.13 Relaciones de PROMETHEE I. Fuente: Brans, 2002.

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 dominancia 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 cual alternativa es mejor en tales casos, el tomador de decisiones debe cargar con esta responsabilidad [104].

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

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \dots \dots \dots ec. 7.18$$

Este es el balance entre los flujos de dominancia positivo y negativo:

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

Figura 7.14 Balance entre flujos de dominancia. Fuente: Brans, 2002.

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 ecuación 7.18.

Dado que el número de criterios es por lo general mayor a dos, es imposible obtener una vista clara de la posición relativa de los puntos con respecto a los criterios, por lo que el conjunto de “n” alternativas puede ser representada como una nube de “n” puntos en un espacio de dimensión “k”. En el plano GAIA se representan no sólo los puntos que indican las alternativas, sino además los vectores unitarios en los ejes de coordenadas que representan a los criterios. Esta herramienta enriquece los resultados de jerarquización al ayudar en el entendimiento de la estructura de los problemas multicriterio.

El software Decision Lab además de presentar una jerarquización parcial y una resultante, genera un plano GAIA, el cual es una proyección ortogonal de los diferentes criterios y alternativas que se encuentran en comparación. En este plano se aprecian de manera gráfica los conflictos que se tienen entre los criterios y la posición de cada alternativa en el mismo. La línea de decisión “pi” (de color rojo en el plano) muestra de acuerdo a los pesos la posición de preferencia del tomador de decisiones. Las alternativas que se encuentran más cercanas a esta línea son las que poseen un mejor desempeño, en el capítulo de Resultados se mostrará dicho plano para cada caso pertinente.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS

8.1 Caso de estudio: botellas de PET primario.

8.1.1 Balance de materia en la producción de PET primario.

En la tabla mostrada a continuación se muestran los resultados obtenidos en el balance de materia para el Poli (Tereftalato de Etileno) primario partiendo, como ya se ha mencionado, de los Coeficientes Insumo-Producto (CIP) reportados en PEP [92]. La obtención de esta tabla se encuentra desglosada en el apéndice de Cálculos:

Tabla 8.1 Balance de materia en la producción de PET primario.			
Ácido Tereftálico		Etilenglicol	
Ton. materia prima/Ton. PET	Materia Prima	Ton. materia prima /Ton. PET	Materia Prima
0.86748	Ácido. Tereftálico	0.33846	Etilenglicol
0.614045	p-xileno	0.25360	Óxido de etileno
0.795422	xilenos	0.220	Etileno
		0.273	Etano

En cuanto a los requerimientos de crudo y gas natural (materias primas de origen) se obtuvo lo siguiente:

a) Refinería.

Se sabe que el porcentaje de xilenos producidos en la refinería de configuración 4 es de 4.8%; por lo tanto, para obtener 795 Kg de esta mezcla a fin de producir una tonelada de PET se tiene que la cantidad de crudo necesaria es: 16,562.5 Kg.crudo/u.f. (ver apéndice de Cálculos).

b) Planta Criogénica.

Según datos tomados de la planta criogénica de Nuevo Pemex, se conoce que la producción de etano (materia prima de interés para la obtención final de etilenglicol) es de 38.39 barriles de etano/millón de ft³ GNH (Gas Natural Húmedo). Utilizando la densidad del etano, se obtiene entonces la producción en kilogramos igual a 7,398 Kg.etano/millón ft³ GNH.

Así, para disponer de 273 Kg. de etano necesario para producir la unidad funcional del PET a partir del procesamiento de Gas Natural Húmedo se tiene que:

$$\left(273 \frac{\text{Kg. etano}}{\text{u. f.}}\right) * \left(\frac{1'000,000 \text{ ft}^3 \text{ GN}}{7398 \text{ Kg. etano}}\right) = 36,901.865 \frac{\text{ft}^3 \text{ GNH}}{\text{u. f.}}$$

8.1.2 Balance de energía en la producción de PET primario.

a) Refinería.

Consumo total de energía en la refinería: 48'966,564 GJ/año, correspondiente a un procesamiento de 105,667.5 miles de barriles/año.

Sabiendo que a partir del balance de materia, el crudo necesario conforme a la unidad funcional es de 113.207 barriles/u.f. (ver apéndice de Cálculos).

Entonces, el consumo de energía para la producción de PET a partir del procesamiento de crudo en la refinería es **52, 457 MJ/u.f.** (equivalentes a 8.8 barriles de petróleo crudo, véase apéndice de Cálculos).

b) Planta Criogénica.

Consumo total de energía en la planta criogénica: 35'233,529 GJ/año, correspondiente a un procesamiento de 240,170x10⁶ ft³G.N.H.

Sabiendo que del balance de materia se obtuvo que el gas natural húmedo requerido de acuerdo a la unidad funcional es 36,901.86 ft³/u.f., entonces el consumo energético es igual a **5,413 MJ/u.f.** (equivalentes a 0.9 barriles de petróleo crudo, ver apéndice de Cálculos).

c) Energía por Servicios.

La tabla 8.2 muestra los requerimientos energéticos por servicios para la producción de PET primario en cada una de sus etapas.

Tabla 8.2 Requerimientos energéticos en la producción de botellas de PET primario.		
	Electricidad (MJ/u.f.)	Gas Natural (MJ/u.f.)
PET	364	2,293
Ácido Tereftálico	458.643	7,658.211
p-xileno	81.662	1,387.026
Etilenglicol	13.52	-
Óxido de etileno	742.302	-
Etileno	22.88	3,038.64
Botellas	11,180	-
Subtotales	12,863.007	14,376.877
Total	27,239.88 MJ/u.f.	

Por lo tanto, la energía consumida en la manufactura de botellas de PET primario es:

Tabla 8.3 Consumo total de energía en la producción de botellas de PET primario.	
	MJ/u.f.
Refinería	52,457
Planta Criogénica	5,413
Etapas de producción de PET	27,240
Consumo total de energía:	85,110 MJ/u.f.

8.1.3 Exergía química de la producción de PET primario.

8.1.3.1 Exergía por servicios.

En la tabla 8.4 se muestra el resumen de la exergía para la cadena de producción correspondiente al PET primario en base a la unidad funcional:

Tabla 8.4 Resumen de exergía por servicios en la producción de botellas de PET primario.			
Servicios Auxiliares por componente.			
Componente	Exergía (MJ/u.f.)	Componente	Exergía (MJ/u.f.)
Xilenos	147.75	Etano	15
p-xileno	5,857.56	Etileno	4917
Acido Tereftálico	17955.57	Óxido de Etileno	4,558.554
		Etilenglicol	2,039.154
Subtotal:	23,960.88	Subtotal:	11,529.708
	Producto	MJ/u.f.	
	PET	5,198	
	Botellas de PET	11,180	
	Total (MJ):	40,688.588	
Total: 51,869 MJ/u.f. equivalentes a 8.7 bpce/u.f.			

Posteriormente en la tabla 8.5 se presenta el balance de exergía para la obtención de PET a partir de ácido tereftálico y etilenglicol, en la cual e°_{prod} hace referencia a la exergía química que interviene en la producción de PET.

Debido a la complejidad de los cálculos que se refieren a todas las etapas de producción de las materias primas y productos que intervienen en la producción de una unidad funcional de PET, en este capítulo sólo presentamos un resumen de las exergías de salida obtenidas para la unidad funcional.

Tabla 8.5 Exergías químicas de salida en la producción de PET primario.			
Ácido Tereftálico		Etilenglicol	
	e°_{prod} (MJ/u.f.)		e°_{prod} (MJ/u.f.)
Ácido Tereftálico	18121.657	Etilenglicol	6552.585
p-xileno	26545.196	Óxido de Etileno	6563.377
Xilenos	34386.116	Etileno	10843.22
Crudo	674716.98	Etano	13799.47
	Producto	MJ/u.f.	
	PET	23705	
Total: 815,234 MJ/u.f. equivalentes a 137 bpce/u.f.			

8.1.3.2 Exergía química de emisiones atmosféricas en la producción de PET primario.

En la tabla 8.6 se presenta la exergía química de contaminantes atmosféricos emitidos en la producción de PET primario (ver apéndice de Cálculos).

Tabla 8.6 Exergía química de contaminantes atmosféricos emitidos en la producción de PET primario.	
Contaminante	Exergía emitida a la atmósfera (MJ/u.f.)
Bióxido de Carbono (CO ₂)	2,984.622
Monóxido de Carbono (CO)	73.044
Bióxido de Azufre (SO ₂)	50.939
Metano (CH ₄)	982.384
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	8.692
Exergía total por emisiones:	4099.6 MJ/u.f.

Fuente: Cálculos propios a partir de datos de Sima Pro.

La irreversibilidad total por emisiones atmosféricas en la producción de botellas de PET primario a partir de la base de datos del software de Ciclo de Vida es de **4,100 MJ/u.f.**

En base al cálculo de las corrientes de exergía involucradas en cada uno de los procesos de producción de PET primario, se presenta el correspondiente balance exergético mediante el siguiente diagrama de bloques:

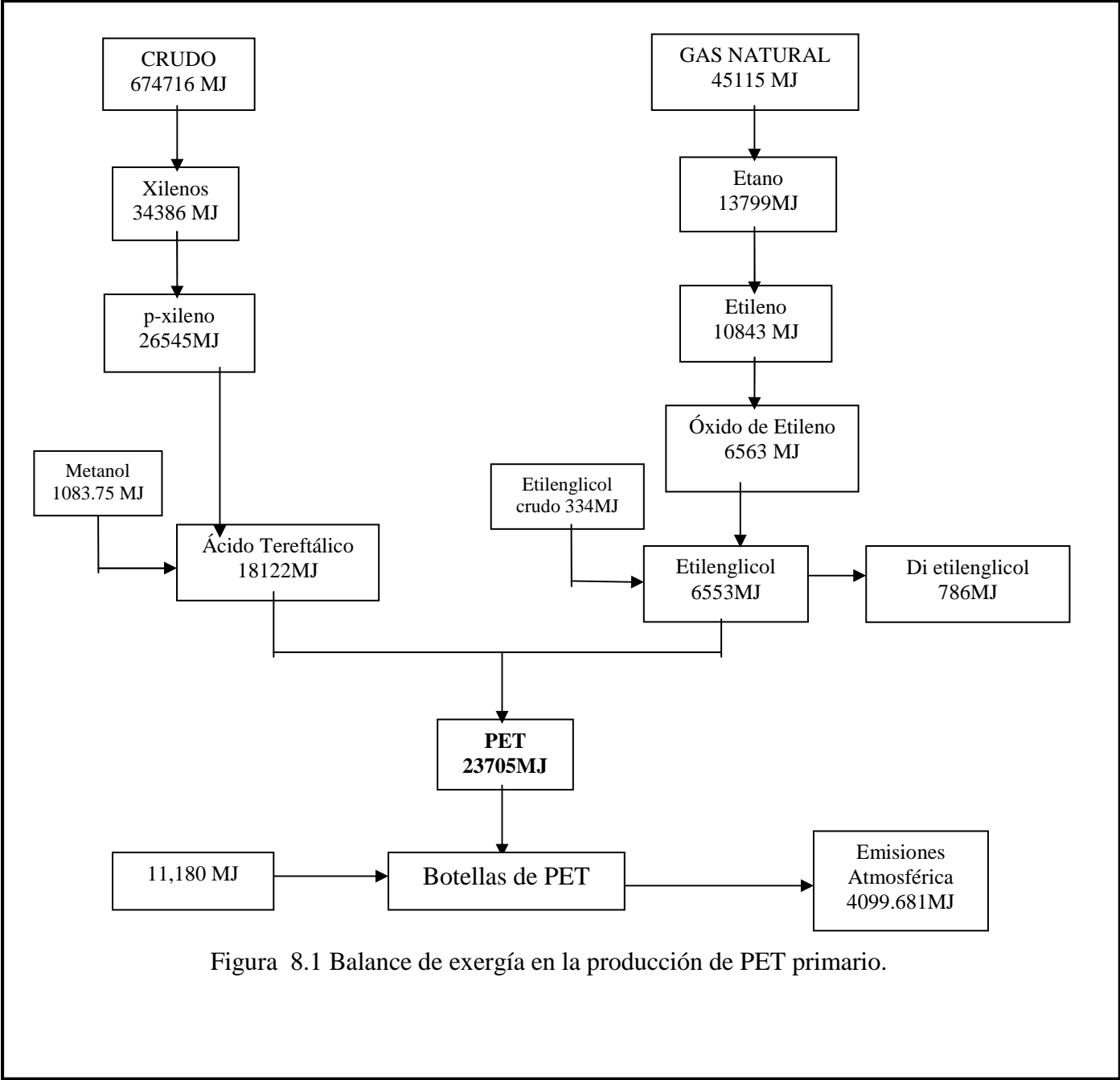


Figura 8.1 Balance de exergía en la producción de PET primario.

La tabulación mostrada a continuación presenta un resumen de las irreversibilidades obtenidas en los procesos involucrados en la obtención de PET primario así como el cálculo de eficiencia simple en los mismos, la cual fue obtenida mediante la ecuación 7.9.

Tabla 8.7 Irreversibilidades y eficiencias de la producción de PET primario.				
Producción de Ácido Tereftálico				
	Exergías			
Proceso	Entrada (MJ/uf)	Salida (MJ/uf)	Irreversibilidad (MJ/uf)	Eficiencia simple (%)
*Xilenos	674,864	614,266.91	60,597.09	91.02
p-xileno	40,241	26,545	13,696	65.97
Ácido Tereftálico	45,585	18,122	27,463	39.75
Irreversibilidad del ácido tereftálico (MJ):			101,756.09	
Producción de Etilenglicol				
	Exergías			
Especie	Entrada (MJ)	Salida (MJ)	Irreversibilidad (MJ)	Eficiencia (%)
**Etano	45,130	44,895	235	99.48
Etileno	18,716	10,843	7,873	57.93
Óxido de Etileno	24,402	6,693	17,709	27.43
Etilenglicol	8,936	7,510	1,426	84.04
Irreversibilidad del etilenglicol (MJ):			27,243	
Producción de PET y fabricación de botellas.				
PET	29,873	23,705	6,168	79.35
Botellas	34,885	23,705	11,180	67.95
Irreversibilidad de la fabricación de botellas (MJ):			17,348	
Irreversibilidad total de producción primaria: 146,347 MJ/u.f. equivalente a 24.5 bpce/uf				

**La exergía a la salida de la Refinería incluye la producción de etileno, propileno, benceno, tolueno, xilenos y combustibles diversos. En el apartado de Cálculos se presenta a detalle el valor exergético de cada producto.*

***La exergía a la salida del procesamiento de Gas Natural Húmedo (GNH) para la obtención de etano incluye la producción del Gas Seco (CH₄), propano, n-butano, i-butano, n-pentano, i-pentano y hexano. De igual manera que en el caso de Refinación, en el apartado de Cálculos se proporciona el valor exergético de la producción completa de la Planta Criogénica.*

En la gráfica que se muestra a continuación se aprecia la contribución en irreversibilidades de los procesos relacionados en la producción de botellas de PET primario. Como se observa, la mayor irreversibilidad corresponde al proceso de refinación necesario para la obtención de la mezcla de xilenos que, como ya se ha mencionado, termina en la producción de ácido tereftálico. La irreversibilidad de la producción de PET y la formación de botellas también es bajo al contribuir con un 4.21 % y 7.64% del total respectivamente. La explicación respecto al valor de irreversibilidad de los xilenos se debe a que para la producción de éstos se tuvo que emplear la energía necesaria para todos los procesos de la refinación del petróleo hasta llegar a la planta BTX (Benceno, Tolueno, Xileno) siendo dichos procesos altamente intensivos en energía.

De lo anterior se afirma que en la fabricación de botellas de PET primario la mayor irreversibilidad corresponde a la obtención de xilenos en relación a los procesos consecutivos.

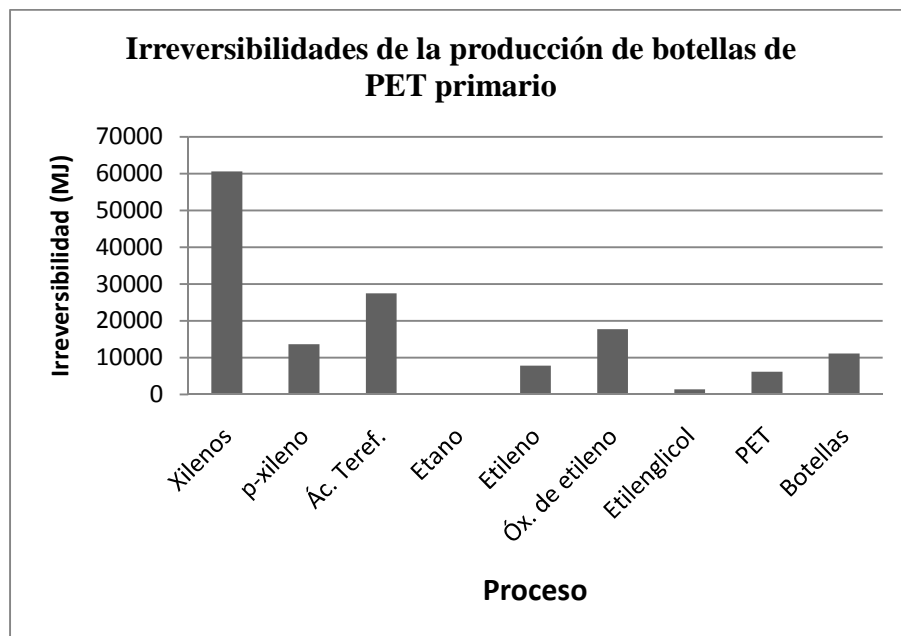


Figura 8.2 Irreversibilidades de la producción de botellas de PET primario.

La irreversibilidad total para botellas de PET primario considerando el valor exergético de las emisiones atmosféricas es de **150, 447 MJ/u.f.**, este valor será comparado contra los que se reporten como irreversibilidades de los procesos de reciclaje e incineración más adelante.

8.2 Caso de estudio: botellas de vidrio primario.

Exergía química del vidrio:

La exergía química de las botellas de vidrio de acuerdo a la unidad funcional es igual a:

$$e_{vidrio} = \left(174 \frac{MJ}{ton}\right)^* \left(14.84 \frac{ton}{u.f.}\right) = 2,582.16 \frac{MJ}{u.f.}$$

*Szargut, 2005.

En las tablas 8.7 a 8.9 se encuentran los requerimientos de materias primas y energía para la producción de botellas de vidrio primario de acuerdo a la unidad funcional.

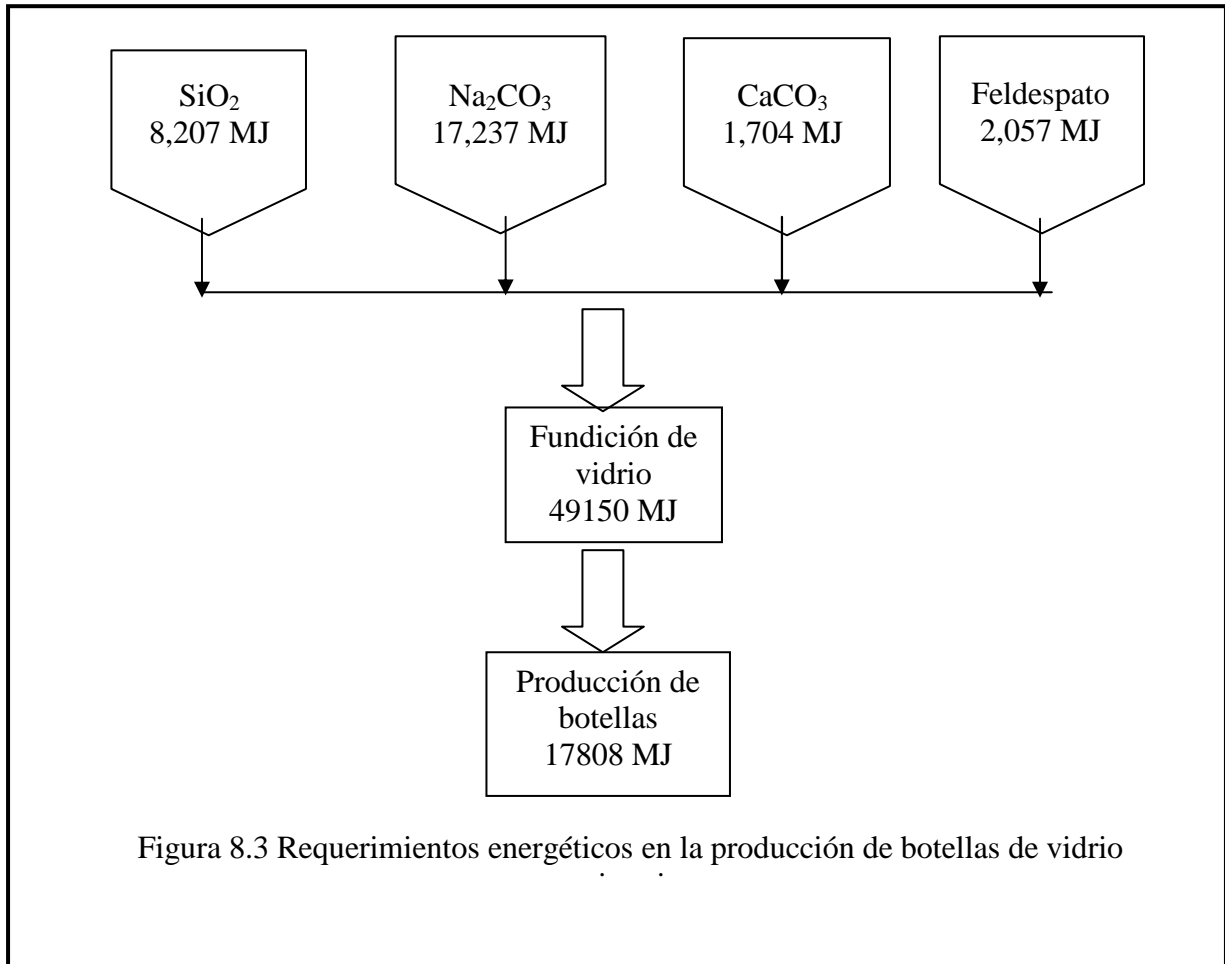
Tabla 8.8 Materia primas para producción de vidrio primario.	
Componente	Kg./u.f.
SiO ₂	10,388
Na ₂ CO ₃	3,413.2
CaCO ₃	4,155.2
Feldespatos	1,124.13

Tabla 8.9 Requerimientos energéticos para la obtención de materias primas del vidrio primario.	
Componente	MJ/u.f.
SiO ₂	8,206.52
Na ₂ CO ₃	17,236.66
CaCO ₃	1,703.63
Feldespatos	2,057.16
Total:	29,203.97

Tabla 8.10 Requerimientos energéticos para la elaboración de botellas de vidrio primario.	
Proceso	MJ/u.f.
Fundición	49,150.08
Formado de Botellas	17,808
Total:	66,958.08

En base a las tablas 8.9 y 8.10, se tiene que el consumo total de energía en la producción de botellas de vidrio primario es igual a **96,162 MJ/u.f.**

Las necesidades energéticas para la elaboración de botellas de vidrio primario se ilustran en la figura mostrada a continuación cuyos valores se encuentran en relacionados a la unidad funcional establecida para este caso de estudio:



Nota: la energía del proceso de fundición del vidrio corresponde a la operación de hornos de fundición eléctricos.

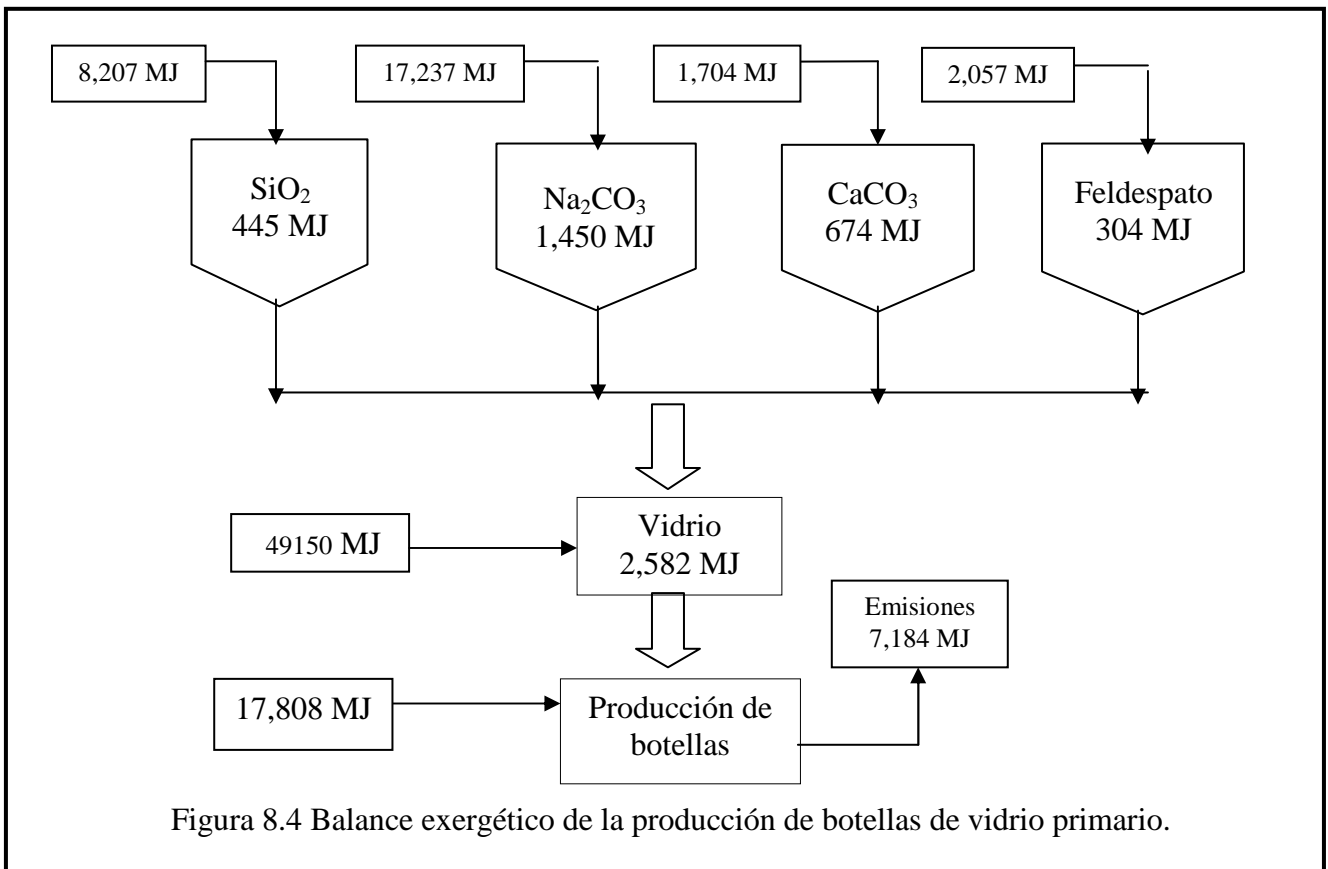
En la Tabla 8.11 se encuentran los valores exergéticos de los componentes que intervienen en la producción del vidrio.

Componente	Exergía química (MJ/u.f.)
SiO ₂	444.95
Na ₂ CO ₃	1449.48
CaCO ₃	673.77
Feldespato	303.515

En la Tabla 8.12 se muestra la exergía química de emisiones atmosféricas en la producción de vidrio primario. (Ver apéndice de Cálculos).

Tabla 8.12 Exergía de emisiones atmosféricas en la producción de botellas de vidrio primario.				
Contaminante	Fórmula	$e_{\text{compuesto}}$ (MJ/Kg)	Kg. emitidos/u.f.	e_{emitida} (MJ/u.f.)
Bióxido de Carbono	CO ₂	0.45	12,396	5578.2
Bióxido de Azufre	SO ₂	4.898	72.816	356.653
Bióxido de Nitrógeno	NO ₂	1.209	47.852	57.853
Monóxido de Carbono	CO	9.823	9.493	93.250
Metano	CH ₄	51.978	21.13	1098.295
			Total de exergía emitida (MJ/u.f.):	7,184.251

Los resultados anteriores se muestran en la Figura 8.4 correspondiente al balance exergético de la producción de botellas de vidrio primario.



En la tabla 8.13 se presentan las irreversibilidades exergéticas resultantes en la producción de botellas de vidrio primario así como los valores de eficiencias simples en cada proceso calculadas mediante la ecuación 7.9.

Tabla 8.13 Irreversibilidades y eficiencias en la fabricación de botellas de vidrio primario.				
Proceso	EXERGÍAS		Irreversibilidad (MJ/uf)	Eficiencia simple (%)
	Entrada (MJ/uf)	Salida (MJ/uf)		
Obtención de SiO ₂	8,207	445	7,762	5.42
Obtención de Na ₂ CO ₃	17,237	1,450	15,787	8.41
Obtención de CaCO ₃	1,704	674	1,030	39.55
Obtención de Feldespato	2,057	304	1,753	14.77
Fundición de Vidrio	52,023	2,582	49,441	4.96
Soplado de Botellas	20,390	2,582	17,808	12.66
Irreversibilidad total de producción primaria: 93,581 MJ/u.f.				

La irreversibilidad en la fabricación de botellas de vidrio primario resulta constituir un valor exergético elevado igual a 93,581 MJ/u.f., ilustrándose en la siguiente gráfica el valor para cada proceso de acuerdo a la información mostrada en tabla 8.13:

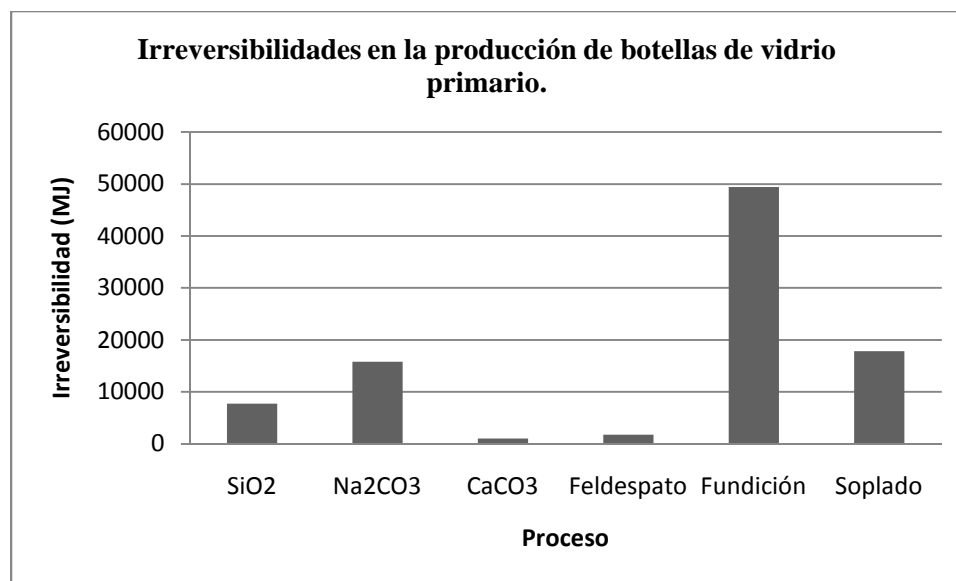


Figura 8.5 Irreversibilidades en la producción de botellas de vidrio primario.

Se aprecia que la fundición del vidrio es el proceso que contribuye con más de la mitad (52%) de las irreversibilidades totales, lo anterior debido a los altos requerimientos energéticos para el funcionamiento de los hornos de fundición.

A través de Sima Pro se obtiene que para la producción de botellas de vidrio primario aplicando la unidad funcional correspondiente, la irreversibilidad por emisiones atmosféricas es de **7,184 MJ/u.f.**, con lo cual la irreversibilidad total es de **100,765 MJ/u.f.**

Más adelante se analizará la irreversibilidad por concepto de emisiones atmosféricas para el reciclaje, por lo pronto, se sabe que en la producción primaria éstas contribuyen con 5.71% al total de las irreversibilidades.

8.3 Caso de estudio: latas de aluminio primario.

Exergía química del aluminio:

La exergía química de las latas de aluminio conforme a la unidad funcional es igual a:

$$e_{aluminio} = \left(32900 \frac{MJ}{ton} \right)^* \left(2.319 \frac{ton}{u.f.} \right) = 76,295 \frac{MJ}{u.f.}$$

*Szargut, 2005.

Las siguientes tres tablas (8.14, 8.15 y 8.16) indican los requerimientos en materias primas y energía necesarios para la producción de latas de aluminio primario.

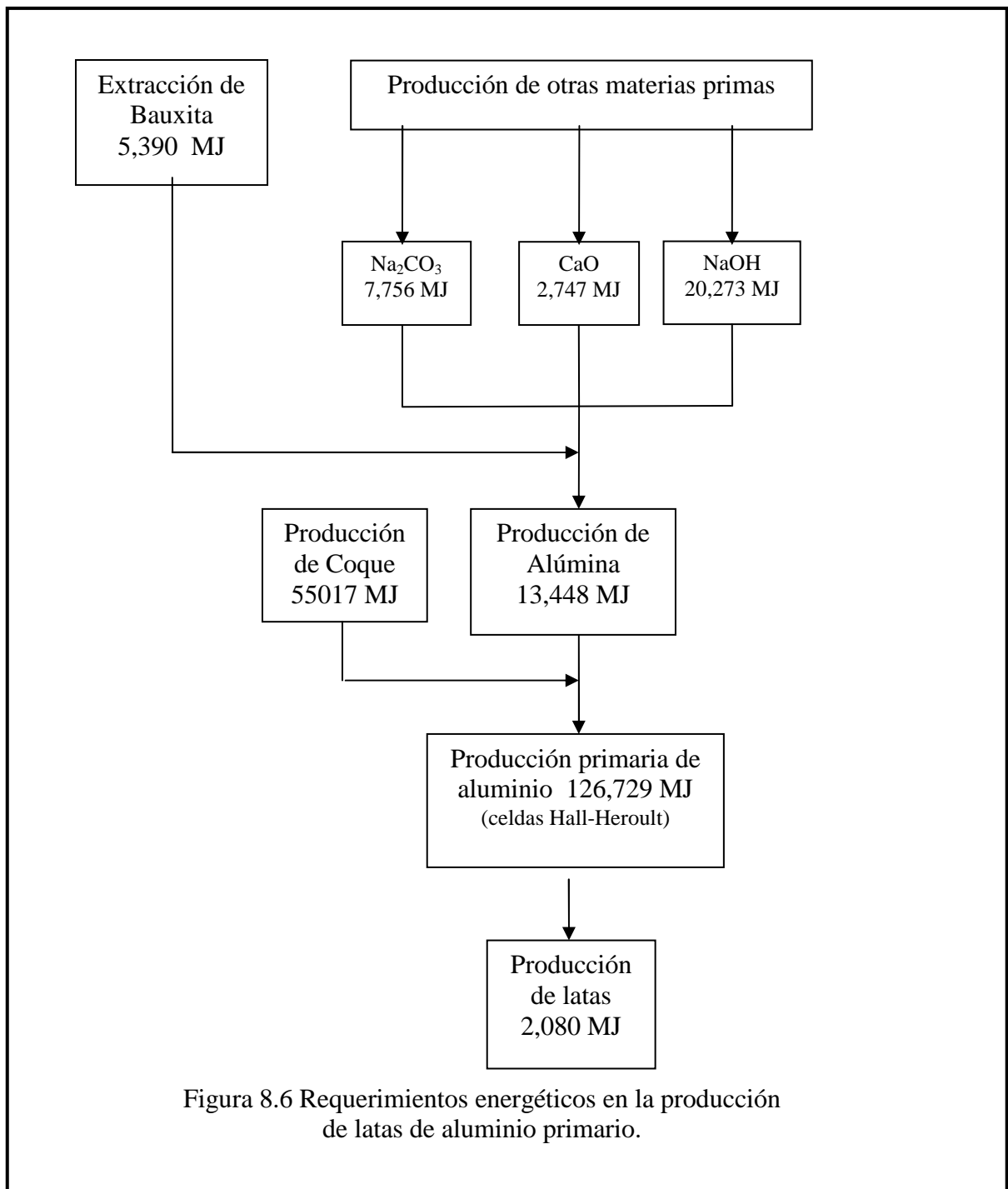
Tabla 8.14 Materias primas para la producción de latas de aluminio primario.	
Componente	Kg/u.f.
Bauxita	10,170.276
Coque (electrodos)	1,183.408
Na ₂ CO ₃	1,120.749
CaO	276.123
NaOH	6,257.14
Alúmina	4,380

Tabla 8.15 Requerimientos energéticos para la obtención de materias primas del aluminio primario.	
Componente	MJ/u.f.
Bauxita	5,390.25
Coque (electrodos)	55,016.63
Na ₂ CO ₃	7,755.58
CaO	2,747.42
NaOH	20,273.13
Alúmina	13,447.61
Total	104,630.6 MJ/u.f.

Tabla 8.16 Requerimientos energéticos para la producción de latas de aluminio primario.	
Proceso	MJ/u.f.
Reducción de Aluminio	126,728.71
Proceso	MJ/u.f.
Fabricación de latas	2,080
Total	128,808.71 MJ/u.f.f

En base a las tablas 8.15 y 8.16, se tiene que el consumo total de energía en la producción de latas de aluminio primario es igual a **233,439 MJ/u.f.**

La figura 8.6 ilustra los requerimientos energéticos en la producción de latas de aluminio primario:



En base a la exergía de cada materia prima que interviene en la producción del aluminio, se presentan los siguientes valores exergéticos de las mismas conforme a la unidad funcional.

Tabla 8.17 Exergía de materias primas del aluminio primario.	
Componente	Exergía química (MJ/u.f.)
Bauxita	2,745.9
Coque (electrodos)	36,754
Na ₂ CO ₃	475.95
CaO	630.07
NaOH	11,719
Alúmina	674.52

La tabla 8.18 muestra los resultados de las emisiones atmosféricas correspondientes a la producción de latas de aluminio primario.

Tabla 8.18 Exergía de emisiones atmosféricas en la producción de latas de aluminio primario.			
Contaminante	Fórmula	Kg.emitidos/u.f.	e _{emitida} (MJ/u.f.)
Bióxido de Carbono	CO ₂	4366.445	1964.900
Bióxido de Azufre	SO ₂	21.624	105.912
Bióxido de Nitrógeno	NO ₂	8.037	9.717
Monóxido de Carbono	CO	219.141	2152.621
Metano	CH ₄	0.0332	1.724
		Total de exergía emitida (MJ/u.f):	4,234.873

A través de los resultados descritos anteriormente, en el siguiente esquema se ilustra el balance de exergía en la producción de latas de aluminio primario:

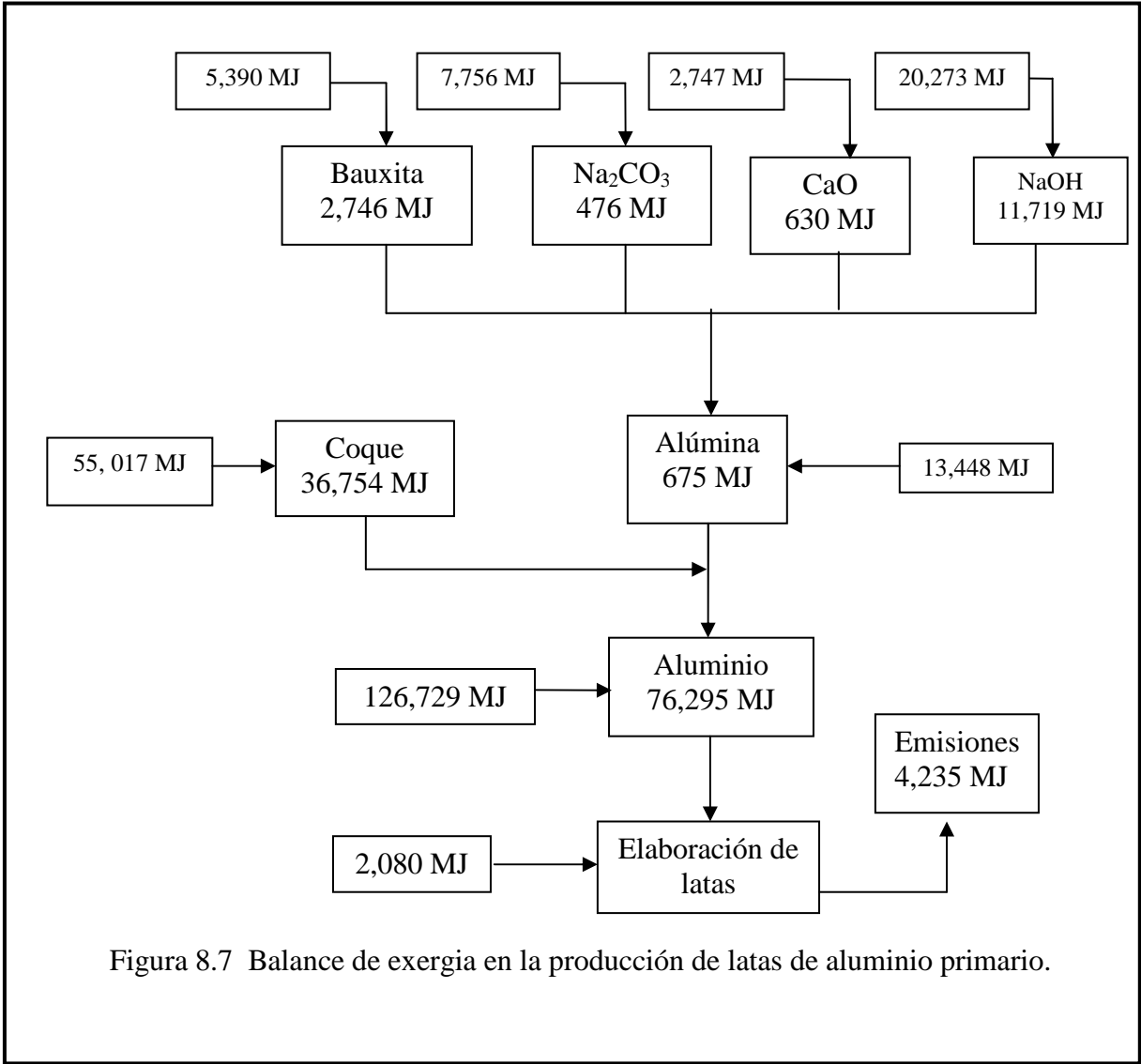


Figura 8.7 Balance de exergía en la producción de latas de aluminio primario.

Las irreversibilidades y eficiencias simples en la producción primaria de latas de aluminio son las siguientes:

Tabla 8.19 Irreversibilidades y eficiencias en la fabricación de latas de aluminio primario.				
Proceso	EXERGÍAS		Irreversibilidad (MJ/uf)	Eficiencia simple (%)
	Entrada (MJ/uf)	Salida (MJ/uf)		
Obtención de Bauxita	5390	2746	2,644	50.95
Obtención de Alúmina	17300	675	16,625	3.90
Obtención de Coque	55,017	36,754	18,263	66.80
Obtención de Na ₂ CO ₃	7,756	476	7,280	6.14
Obtención de CaO	2,747	630	2,117	22.93
Obtención de NaOH	20,273	11,719	8,554	57.80
Electrólisis	170,563	76,295	94,268	44.73
Producción de Latas	78,375	76,295	2,080	97.35
Irreversibilidad total de producción primaria:			151,831 MJ/u.f.	

En la figura 8.8 se ilustran las irreversibilidades exergéticas en cada uno de los procesos que conforman la producción de latas de aluminio primario.

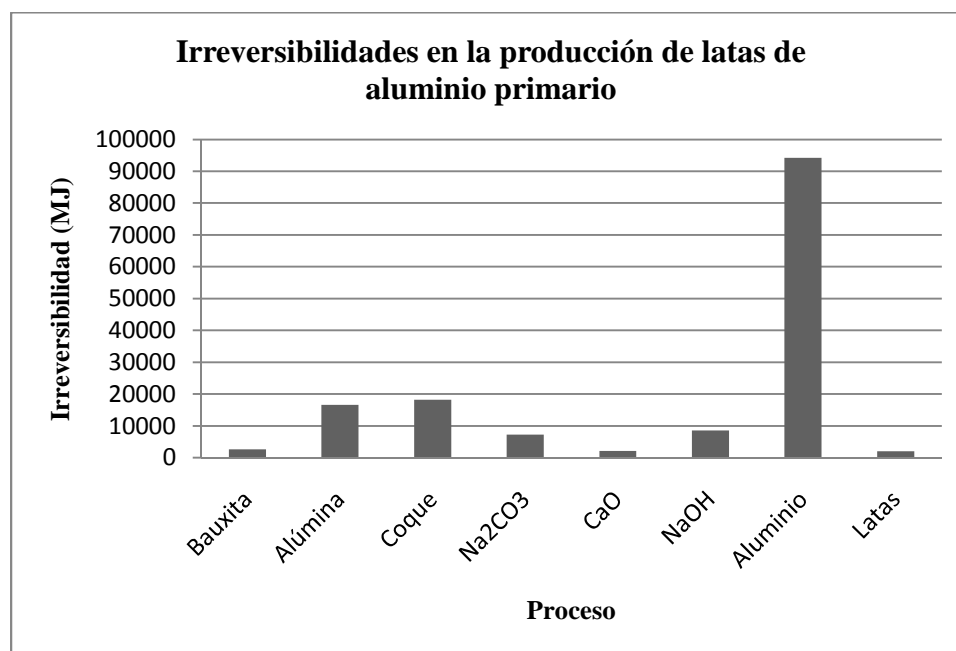


Figura 8.8 Irreversibilidades en la producción de latas de aluminio primario.

Las irreversibilidades en la producción de latas de aluminio primario resultan tener un total de 151,831 MJ/u.f., debido en mayor porcentaje (62%) a la reducción del aluminio ya que la demanda energética del proceso electrolítico es alta. Como se ha mencionado en el capítulo 5, el consumo de energía requerida para la elaboración de aluminio secundario es 95% menor respecto al proceso con materias primas de origen, ésta es la principal razón por la que los fabricantes tienen especial interés en la recuperación de latas post-consumo ya que esto implica ahorros energéticos y en consecuencia ahorros económicos. Por otra parte, desde el punto de vista termodinámico, el aluminio constituye un material con una contribución exergética importante para ser depositada en un tiradero como fin de su ciclo de vida. En el caso de la irreversibilidad por concepto de emisiones atmosféricas, éstas resultan ser de **4,235 MJ/u.f.**, valor intermedio respecto a las correspondientes a botellas de vidrio (7,184 MJ/u.f.) y PET (4,100 MJ/u.f.), este comportamiento se analizará más adelante para el caso de reciclaje.

RECICLAJE.

8.4 Caso de estudio: botellas de PET secundario.

En base a los Coeficientes Insumo-Producto (CIP) [92] para el caso de PET secundario, resulta el siguiente balance de exergía para el cual se presentan las dos tablas 8.20 y 8.21. En la primera de ellas se especifica cada una de las especies involucradas en el proceso de reciclaje de este material, mientras que en la segunda se trata de un resumen de dicho proceso donde las emisiones atmosféricas están calculadas de acuerdo a la base de datos de Sima Pro. Por último, se ilustra el balance exergético a través de un diagrama de bloques:

Tabla 8.20 Exergías para la elaboración de PET secundario.	
Componente	e° (MJ/u.f.)
PET	23,778.011
Etilenglicol	252.533
Sub-Productos	e° (MJ/u.f.)
Etilenglicol	-274.997
Servicios Auxiliares	e° (MJ/u.f.)
Agua de enfriamiento	600
Electricidad	363.6
Gas Natural	833.3

Tabla 8.21 Balance exergético para el elaboración de PET secundario.	
Exergía química	MJ/u.f.
Entrada	37,017
Salida	23,980
Emisiones atmosféricas	1,076

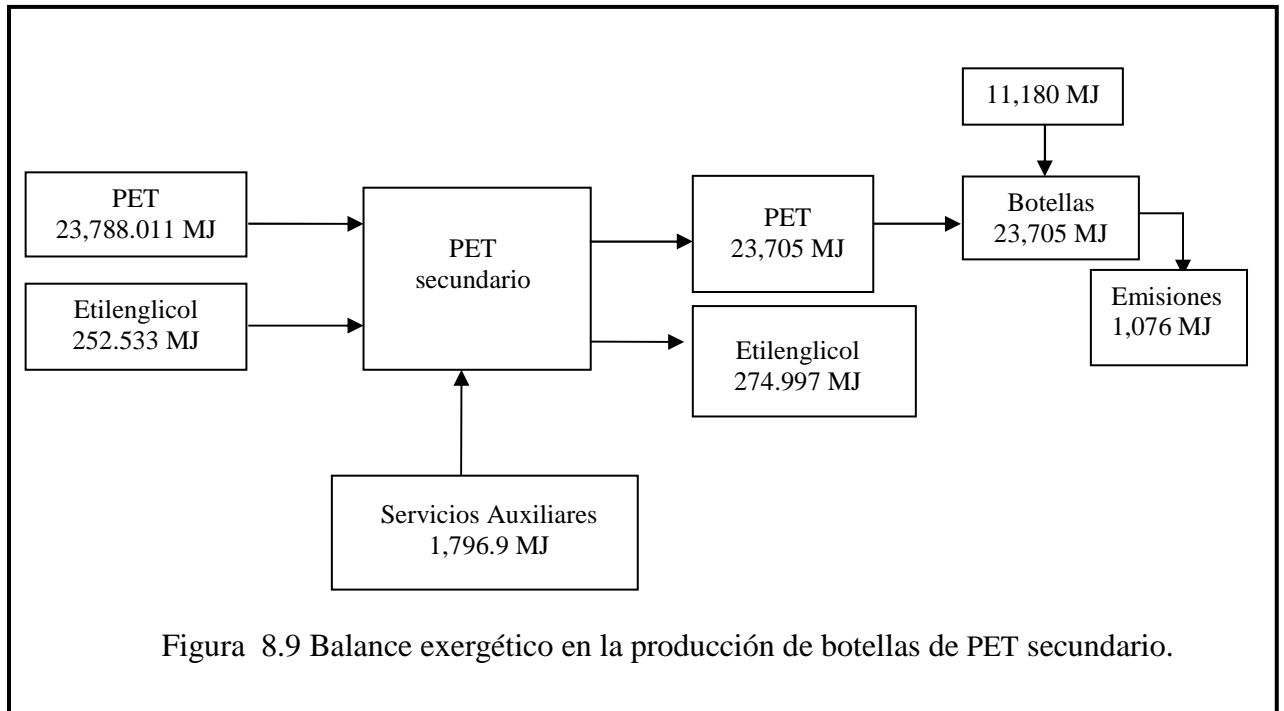


Figura 8.9 Balance exergético en la producción de botellas de PET secundario.

Tabla 8.22 Irreversibilidades y eficiencias en la producción de botellas de PET secundario.				
Proceso	EXERGÍAS		Irreversibilidad (MJ/uf)	Eficiencia simple (%)
	Entrada (MJ/uf)	Salida (MJ/uf)		
Producción de PET secundario	25,837.433	23,980	1,857.433	92.81
Producción de botellas	34,885	23,705	11,180	67.95
Irreversibilidad de reciclaje:			13,037.433 MJ/u.f.	

La irreversibilidad del proceso de reciclaje de PET respecto al proceso primario del mismo disminuye considerablemente al presentar una diferencia de 136,334 MJ (considerando el valor exergético de emisiones atmosféricas), por lo que el valor de irreversibilidad exergética en este proceso representa sólo un **9.38%** en relación al proceso primario. Este

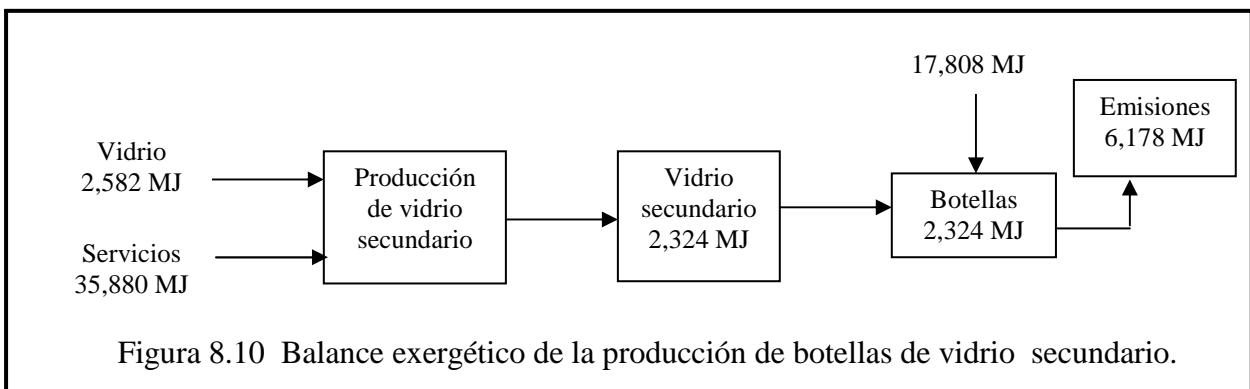
resultado se debe en mayor medida a que, como se analizó en su momento, la obtención de ácido tereftálico conlleva una elevada irreversibilidad (101, 756 MJ/u.f.) a lo largo de los procesos que parten de la refinación de crudo. Asimismo, un comportamiento similar se puede observar en las emisiones atmosféricas al disminuir éstas en un valor exergético de 3,024 MJ/u.f.

Así, se puede decir de modo preliminar que para este material, el reciclaje representa una alternativa importante a considerar desde el punto de vista exergético debido a la elevada eficiencia obtenida y a la disminución de emisiones atmosféricas, lo anterior a causa de la contribución por el ahorro de materias primas de origen (crudo y gas natural).

8.5 Caso de estudio: botellas de vidrio secundario.

Con el vidrio se consigue un reciclado eficaz porque la materia se aprovecha de forma íntegra, mantiene todas sus propiedades tras el reciclado y ahorra energía en la fabricación de nuevos envases. El ahorro energético que supone el empleo de vidrio recuperado se valora en un 27% sobre el que se consumiría utilizando materias primas vírgenes [89].

Sabiendo que la producción de vidrio a partir de una mezcla 50% de vidrio recuperado y 50% de materias primas vírgenes contribuye en un 14% reducción de emisiones atmosféricas, se tiene el siguiente balance de exergía de vidrio secundario, en los cuales se considera un rendimiento de proceso igual a 90% [31]:



En la tabla 8.23 se presentan los resultados de irreversibilidades y eficiencias en el proceso de reciclaje de las botellas de vidrio.

Tabla 8.23 Irreversibilidades de la producción de botellas de vidrio secundario.				
Proceso	EXERGIAS		Irreversibilidad (MJ)	Eficiencia simple (%)
	Entrada (MJ)	Salida (MJ)		
Producción de vidrio secundario	38,462	2,324	36,138	6.04
Producción de botellas	20,132	2,324	17,808	11.5
Irreversibilidad de reciclaje:			53,946 MJ/u.f.	

Por medio del ahorro energético que implica la fabricación de vidrio mediante la utilización de materias primas vírgenes disminuidas en un 50%, la irreversibilidad es de 53,946 MJ/u.f. El valor exergético de las emisiones es 6,178 MJ/u.f. (14% de reducción), con lo cual la irreversibilidad total del proceso de reciclaje de vidrio es 60,124 MJ/u.f. que representa un **59.6%** respecto al valor obtenido en el proceso primario de este material. Por lo tanto, a través del reciclaje del vidrio se consigue reducir la irreversibilidad exergética del proceso en un 40%.

8.6 Caso de estudio: latas de aluminio secundario.

En el proceso de reciclaje de este material se recolectan las latas que se envían a un proceso de fundición para ser convertidas en lingotes y posteriormente en láminas de aluminio. Por evidencia empírica se sabe que los procesos industriales que transforman la materia prima virgen para la producción de aluminio consumen grandes cantidades de energía eléctrica y generan residuos llamados “lodos rojos” que contaminan el agua y el suelo con óxidos y silicatos. En consecuencia, el reciclaje de este material proporciona grandes ahorros de energía y desechos contaminantes. Cuando se utiliza aluminio recuperado para fabricar latas en lugar de materias primas vírgenes, se consigue un ahorro de 95% en la cantidad de energía requerida en el proceso y 95% de reducción de emisiones atmosféricas [31]. En el cálculo exergético correspondiente al reciclaje de aluminio se consideró un valor promedio de rendimiento de dicho proceso igual a 88% [106].

En la figura 8.11 se ilustra el balance de exergía resultante en el reciclaje de latas de aluminio:

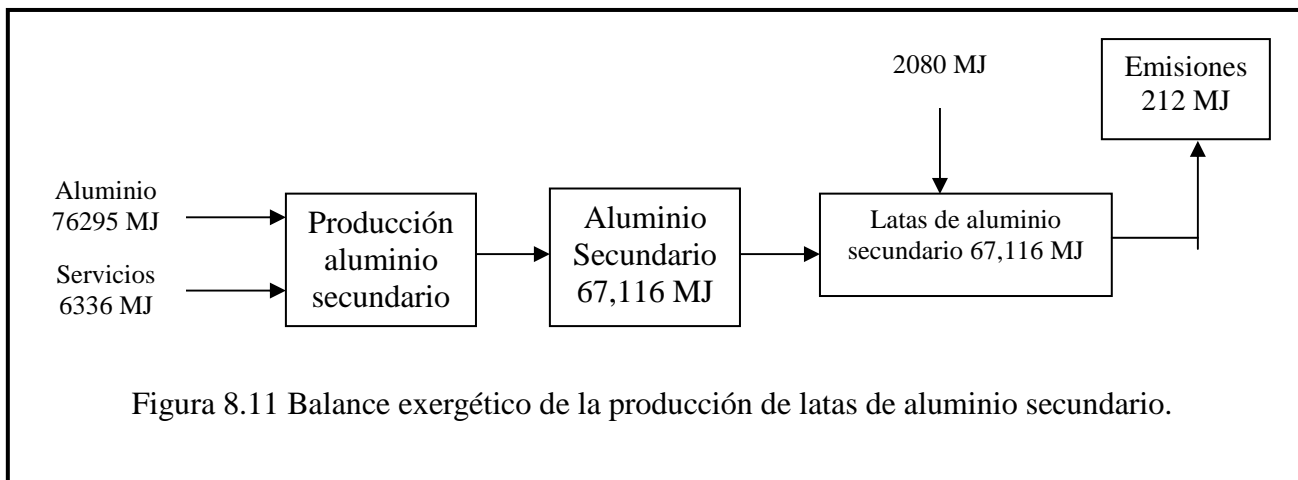


Tabla 8.24 Irreversibilidades de la producción de latas de aluminio secundario.				
Proceso	EXERGÍAS		Irreversibilidad (MJ)	Eficiencia simple (%)
	Entrada (MJ)	Salida (MJ)		
Producción de aluminio secundario	82,631	67,116	15,515	81.2
Producción de latas	69,196	67,116	2,080	96.9
Irreversibilidad de reciclaje:			17,595 MJ/u.f.	

Las irreversibilidades exergéticas disminuyen a 17,595 MJ/u.f. en el proceso de reciclaje de latas de aluminio, partiendo de una irreversibilidad total de producción del aluminio primario de 151,831 MJ/u.f., lo cual representa tan sólo el **11.6%** respecto a la producción primaria.

8.7 Caso de estudio: incineración de botellas de PET

Este estudio parte del conocimiento del poder calorífico de cada uno de los materiales con el propósito de conocer la capacidad de cada uno de ellos respecto a su aportación energética. Enseguida se muestra la tabla 8.25 con dichos datos en unidades de MJ/Kg. y MJ/u.f.:

Tabla 8.25 Poder Calorífico de los materiales para envasado bajo estudio.			
Material	Poder Calorífico (MJ/Kg.)	Poder Calorífico (MJ/u.f.)	Referencia
PET	30.2	30,200	[107]
Vidrio	0.196	2,908.64	[108]
Aluminio	31.00	71,889	[108]

A diferencia del proceso de reciclaje en el que se cuantifica el comportamiento de las irreversibilidades exergéticas respecto a la producción primaria, lo que se busca en el proceso de incineración es generar un beneficio a través de la generación de energía utilizando el poder calorífico de un material que, de lo contrario, representaría un valor exergético depositado en un tiradero.

De la misma manera que en los casos de proceso primario y reciclaje, las emisiones del proceso de incineración deben ser consideradas en el balance de exergía.

A causa de la variedad en los sistemas de generación de energía a partir de la incineración de residuos sólidos, en promedio se considera que las pérdidas de calor durante dicho proceso son aproximadamente de 8% del poder calorífico de los materiales [108].

Generalmente, la instalación de plantas de incineración es rechazada por parte de la población, debido a que éstas representan la emisión de contaminantes atmosféricos; sin embargo, los sistemas modernos disponibles están diseñados y construidos para no presentar riesgo alguno para la salud humana ni el medio ambiente. Asimismo, las cenizas resultantes de dicho proceso deben ser dispuestas en un relleno sanitario apropiado.

La incineración del PET se realiza a una temperatura de 700°C debido a que las temperaturas menores conducen a la formación de ésteres indeseables por provocar obstrucción, mientras que a temperaturas superiores disminuye la fracción deseable de aromáticos en el condensado [107]. El PET al estar compuesto por C, H y O, su combustión es limpia y puede utilizarse eficazmente como sustituto de combustibles fósiles en la producción de energía y contribuir con ello al ahorro de fuentes de energía no renovables [109].

De la base de datos de Sima Pro para el tratamiento de residuos sólidos por incineración, se obtuvieron las siguientes cantidades de emisiones atmosféricas en el proceso de incineración controlada de botellas de PET, asimismo se indica la exergía química correspondiente:

Tabla 8.26 Exergía de emisiones atmosféricas en el proceso de incineración de botellas de PET.		
Contaminante emitido	Kg/u.f.	Exergía química (MJ/u.f.)
CO ₂	3.784	1.703
CO	0.028	0.275
SO ₂	0.002	0.010
NO ₂	0.0158	0.019
CH ₄	0.0000547	0.003
Exergía total de emisiones: 2.01 (MJ/u.f.)		

Fuente: calculada a partir de la base de datos de Sima Pro.

El balance de exergía, se muestra en la Figura 8.12, en donde puede observarse que la exergía a la salida es de 27,784 MJ/uf (equivalentes a 7,718 kWh/uf). El valor resultante de irreversibilidad es de 2,963 MJ/uf.

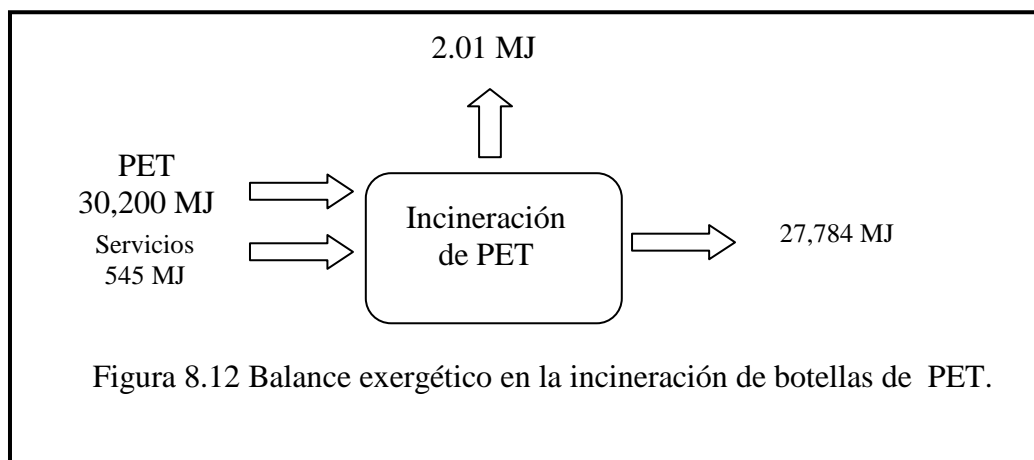


Figura 8.12 Balance exergético en la incineración de botellas de PET.

Tabla 8.27 Irreversibilidades en la incineración de botellas de PET.		
Entrada (MJ)	Salida (MJ)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
30,745	27,784	2,961
Emisiones atmosféricas		2.01
Total de irreversibilidad:		2,963.01 MJ/u.f.

Por medio de la incineración de botellas de PET se obtiene una disminución en irreversibilidad equivalente a 143,384 MJ/u.f., respecto a la producción primaria, es decir, que a través del procesamiento del PET por incineración se consigue un 97% de reducción en pérdidas de exergéticas.

La emisión de dioxinas provoca que las plantas de incineración no sean consideradas factibles; sin embargo, en una incineración de botellas de PET debidamente controlada, estas sustancias resultan ser muy bajas y, por lo tanto, su contribución como irreversibilidad también. Las dioxinas reportadas como *2,3,7,8-Tetraclodibenzo-p-dioxina* no se encuentran contabilizadas en el balance de exergía ya que a pesar del elevado valor exergético de esta sustancia igual a 17,249.42 KJ/Kg [110], la cantidad emitida es de tan sólo 9.04×10^{-12} Kg/u.f. cuyo valor exergético es de 1.559×10^{-10} MJ/u.f.

No se proporciona un balance exergético de la incineración de vidrio y aluminio debido a que la ausencia del elemento Carbono en la composición de éstos no cumpliría con la principal finalidad de este proceso que es la generación energética. De hecho, la combustión de estos materiales correspondería a la etapa de fundición en la producción secundaria de los mismos. Asimismo, el rango de temperatura de combustión en los incineradores alimentados de residuos sólidos urbanos abarca entre 760°C-870°C para evitar el olor desprendido en la combustión incompleta, por lo que, las temperaturas alcanzadas son insuficientes para quemar o incluso fundir el vidrio y aluminio [7], que se encuentran en el rango de 1500°C.

También es importante hacer notar que la incineración de las botellas de PET, puede influir sobre el *aumento en la demanda de producción primaria de este material*.

Asimismo, se debe recordar que en los resultados proporcionados, se consideró *únicamente* la incineración de las botellas de PET, por lo que, el tratamiento térmico de las botellas mezcladas con otro tipo de residuos sólidos cambiará debido a las propiedades de éstos y consecuentemente las emisiones a la atmósfera serán distintas.

El tema de incineración queda limitado al balance exergético, debido a que la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos no es el objetivo principal de esta tesis y requiere un estudio económico más profundo y detallado.

8.8 Algunas comparaciones entre la producción primaria y secundaria de envases

Una vez calculadas las irreversibilidades de los materiales en su producción primaria y secundaria, se tiene la siguiente tabla en forma de resumen:

Tabla 8.28 Resumen de irreversibilidades para materiales de envasado.			
Material	Irreversibilidad (MJ/u.f.)		
	Producción primaria	Reciclaje	Incineración
PET	146,347	13,037	2,963
Vidrio	93,581	53,946	-
Aluminio	151,831	17,595	-

En base al criterio de irreversibilidad, la tabla anterior es importante para disponer de elementos en la realización de comparaciones de los materiales de envasado.

Hablando de la producción primaria, las latas de aluminio resultan tener el valor más alto en irreversibilidad, convirtiendo a la fabricación de dicho material en aquella con una mayor pérdida de exergía. Las botellas de PET quedan situadas en un lugar intermedio entre las latas de aluminio y las botellas de vidrio, siendo éstas últimas las que constituyen la producción primaria con menor pérdida de exergía.

Este comportamiento de las irreversibilidades queda ilustrado mediante la figura 8.13 para los tres materiales en su producción primaria y secundaria.

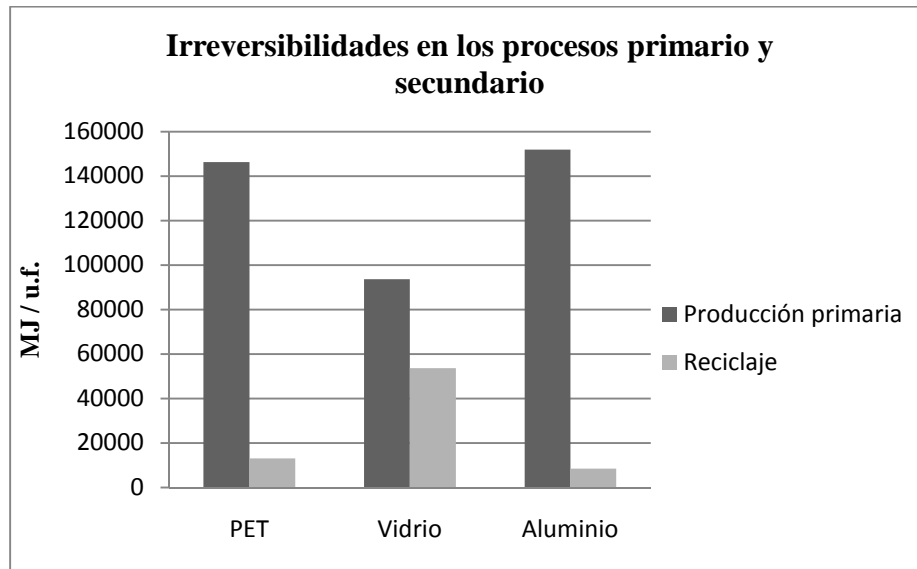


Figura 8.13 Irreversibilidades en los procesos primario y secundario.

Como puede observarse, las irreversibilidades en la producción secundaria o reciclaje experimentan un comportamiento de disminución muy marcado, presentando los siguientes valores de disminución:

Material	Disminución de irreversibilidad (MJ/u.f.)	% reducido respecto a la producción primaria.
PET	133,310	91
Vidrio	39, 635	42
Aluminio	134,236	88

Las latas de aluminio tienen la reducción más importante en irreversibilidades con 134,236 MJ/u.f., es decir, que el material cuya producción primaria tiene mayor pérdida de exergía, tiene a la vez un proceso de reciclaje muy importante. Por su parte, las botellas de PET son

el material que se ubica en segundo lugar dentro del comportamiento de reducción de pérdidas exergéticas mediante el proceso de elaboración secundaria, con tan sólo 926 MJ de diferencia respecto a la disminución lograda con el reciclaje del aluminio, con lo cual para el PET, el reciclaje sigue representando una opción de importancia. Por último, a través del reciclaje de vidrio se consigue una reducción de 39,635 MJ/u.f., que de igual manera constituye un ahorro importante al utilizar menor cantidad de exergía de las materias primas provenientes de reservorios minerales además de la modificación de requerimientos energéticos.

Sin embargo, considerando los porcentajes de reducción de pérdidas de exergía en el reciclaje en comparación a las producciones primarias, a través de las botellas de PET se consigue el mayor porcentaje de disminución en lo referente a irreversibilidades exergéticas.

La tabla 8.30 contiene el resumen de irreversibilidades exergéticas por conceptos de emisiones atmosféricas:

Tabla 8.30 Resumen de exergía por emisiones atmosféricas.			
Material	Primario (MJ/u.f.)	Reciclaje (MJ/u.f.)	Incineración (MJ/u.f.)
PET	4,100	1,076	2.01
Vidrio	7,184	6,178	-
Aluminio	4,235	212	-

Respecto a la producción primaria, el reciclaje de los tres materiales de envasado experimenta disminuciones considerables en el valor exergético emitido a la atmósfera en forma de gases contaminantes.

Utilizando como criterio sólo la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera, se obtiene la siguiente tabulación de resultados:

Tabla 8.31 Toneladas de CO _{2eq} emitidas en la producción de envases.			
	Ton. CO _{2eq} / u.f.		
Material	Producción Primaria	Reciclaje	Incineración
PET	5.55	3.26	0.0085
Vidrio	27.20	23.39	-
Aluminio	7.20	0.36	-

Fuente: Base de Datos Sima Pro

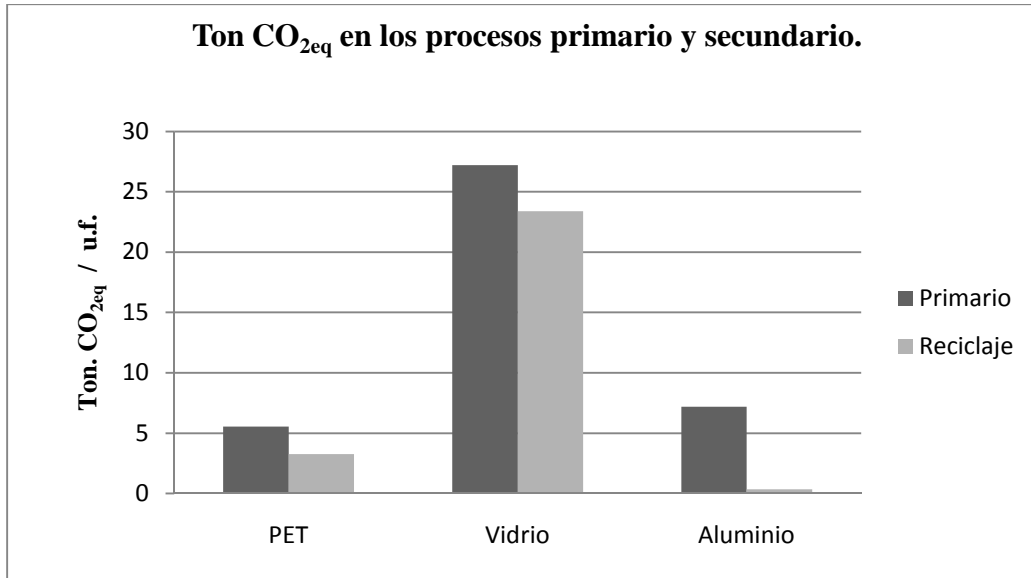


Figura 8.14 Toneladas de CO_{2eq} en los procesos primario y secundario.

La cantidad de CO₂ emitida por cada uno de los materiales se encuentra notablemente disminuida en el proceso secundario en relación a los materiales primarios.

8.9 Estudio económico

Con el propósito de disponer de elementos económicos respecto a los materiales en estudio se presentan a continuación comparaciones de costos de producción y márgenes de ganancias económicas por unidad funcional entre los materiales primarios y secundarios considerando una depreciación lineal.

Material	Costo de producción primaria (\$/u.f.)	Costo de producción secundaria (\$/u.f.)	% de ahorro
PET	7,800	4,860	38
Vidrio	27,863	22,896	18
Aluminio	41,742	27,966	33

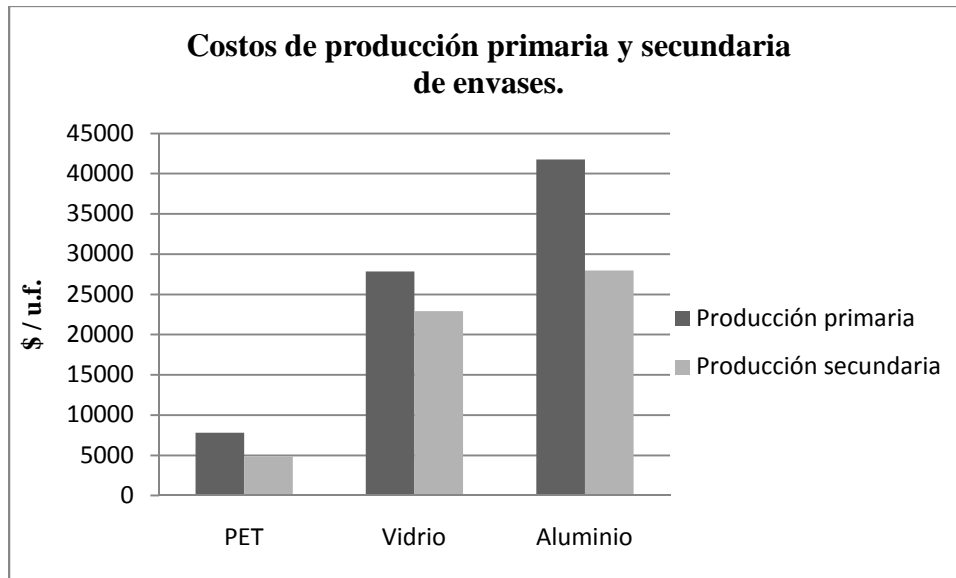


Figura 8.15 Costos de producción primaria y secundaria de envases.

En la tabla 8.32 se aprecian los ahorros alcanzados en los costos de producción secundaria, en los cuales el reciclaje de botellas de PET constituye el proceso con mayor porcentaje de ahorro respecto a su producción primaria. El reciclaje de aluminio representa para los fabricantes un 33% de ahorro en costo de producción, mientras que con el reciclaje de vidrio se consigue sólo un 18%, el bajo ahorro en costo de producción por reciclaje de vidrio explica la causa del bajo precio de compra de este material en los centros de acopio de tan sólo 50 centavos/Kg de vidrio. Dichos datos de producción secundaria contemplan el costo de recolección y distribución de residuos para su reciclaje, el cual, de acuerdo a lo expuesto en el capítulo 6, tiene un valor promedio de 120 dólares/tonelada para un flujo de 25% residuos reciclados. Además, por medio de la gráfica correspondiente, se visualiza la ventaja que el PET ofrece en relación a los bajos costos en ambos tipos de producción por unidad funcional, en comparación con el vidrio y aluminio.

En la tabla 8.33 se enlistan las ganancias económicas con depreciación lineal para los tres tipos de envases primarios:

Material	Costo de producción (\$/u.f.)	Precio de venta (\$/u.f.)	Ganancia incluyendo depreciación (\$/u.f.)
PET	7,800	19,320	6,912
Vidrio	27,863	39,008	6,693
Aluminio	41,742	58,439	10,018

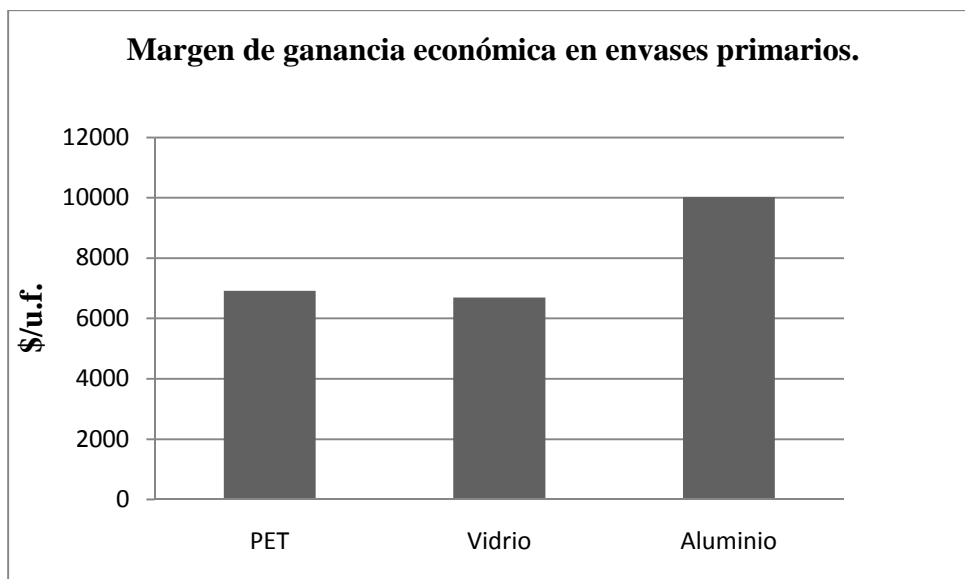


Figura 8.16 Margen de ganancia económica en envases primarios.

El PET primario es el material con el menor costo de producción como lo indica la tabla anterior, esto explica, desde el punto de vista económico el rápido incremento en su uso como envase para contención de bebidas, ya que los fabricantes a través del precio de venta recuperan más del doble de su costo de producción. El aluminio en cambio ha experimentado aumentos paulatinos e inestables en sus costos de producción en los últimos años. En cuanto al vidrio, éste presenta la menor ganancia con un valor de 6,693 \$/u.f.

La ganancia económica por unidad funcional en la producción secundaria de envases corresponde a los valores expuestos en la tabla 8.34:

Material	Costo de producción secundaria (\$/u.f.)	Precio del material reciclado (\$/u.f.)	Ganancia incluyendo depreciación (\$/u.f.)
PET	4,860	11,101	3,745
Vidrio	22,896	28,620	3,443
Aluminio	27,966	34,958	4,195

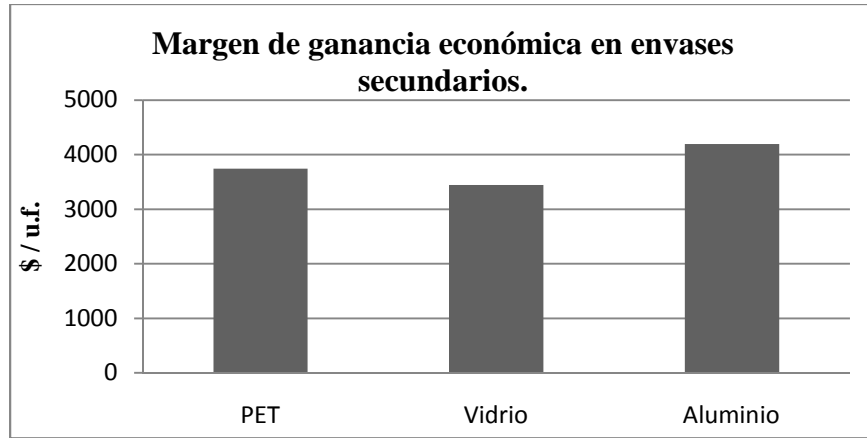


Figura 8.17 Margen de ganancia económica en envases secundarios.

En un principio se puede afirmar que las ganancias económicas que representa el proceso de reciclaje de materiales de envasado no tienen una diferencia significativa que coloque en posición de ventaja a determinado material; sin embargo, no se debe perder de vista la unidad funcional en operación, ya que la ganancia obtenida por reciclaje de aluminio es por el reciclaje de 2.319 toneladas, mientras que la ganancia por reciclar botellas de PET es de 1 tonelada. De acuerdo a esto, la ganancia por reciclaje de botellas de vidrio es muy baja al considerar que se están tratando 14.84 toneladas para cumplir con dicha unidad funcional.

A través de la gráfica que se presenta a continuación se visualiza la diferencia de la ganancia económica percibida por los fabricantes al producir envases partiendo materiales vírgenes, respecto a la ganancia obtenida por el reciclaje de los mismos:

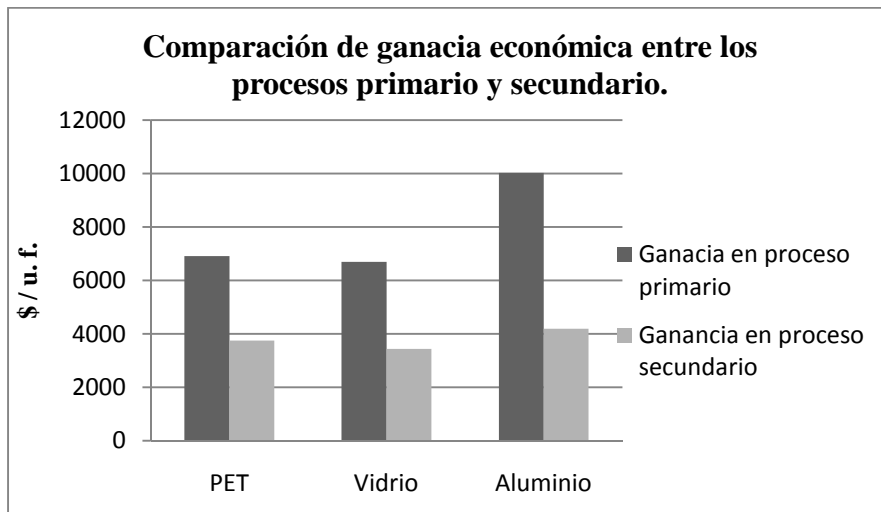


Figura 8.18 Comparación de ganancia económica entre los procesos primario y secundario.

De esta manera en la figura anterior queda comprobado que la diferencia de ganancias entre ambos procesos es considerable, a favor de la producción primaria, razón de peso que provoca un bajo índice en el reciclaje de materiales de envasado. Además de esta diferencia hay que recordar que las empresas pequeñas de reciclaje deben lidiar con problemas derivados de la falta de infraestructura adecuada para la recolección y acarreo de los residuos, lo cual eleva aún más su respectivo costo de producción.

8.10 Análisis Multicriterio

En base a los resultados hasta ahora obtenidos y descritos, los criterios para la toma de decisiones son:

- Irreversibilidad exergética (MJ/u.f.): criterio con objetivo a minimizar ya que esto significa que la eficiencia de los procesos aumenta contribuyendo de esta forma a la sustentabilidad desde la perspectiva termodinámica.
- Emisiones de CO₂ (Ton._{eq.}/u.f.): dado que el CO₂ es un gas contaminante de referencia como indicador de sustentabilidad ambiental, este criterio se pretende minimizar.
- Energía real (MJ/u.f.): la energía consumida en el ciclo de vida de cada uno de los envases analizados también se trata de un criterio a minimizar para cumplir con el objetivo de disminuir el consumo de energéticos provenientes de recursos naturales no renovables.
- Ganancia (\$/u.f.): no se puede perder de vista que, independientemente de la voluntad y acciones para incrementar la sustentabilidad a través de la eficiencia termodinámica y cuidado del medio ambiente, el factor económico representa también un elemento de importancia, por lo que a diferencia de los tres criterios anteriores, la ganancia representa un criterio a maximizar.

Para llevar a cabo el Análisis Multicriterio, se ha aplicado la metodología PROMETHEE-GAIA explicado anteriormente en el Capítulo 7.

Se tomó la decisión de otorgar menor peso al criterio de ganancia, debido a que, el principal enfoque de este trabajo es el desarrollo sustentable desde su perspectiva de usos eficiente de la energía y de conservación de recursos naturales no renovables, por lo que se consideró adecuado que los pesos para cada criterio fueran para la irreversibilidad exergética 30%, emisiones atmosféricas 30%, energía real 30% y ganancia económica 10%.

De esta manera en la presente tesis se abarcan criterios de carácter trascendental que de forma obligatoria se deben tomar en cuenta para una toma de decisiones de forma integral.

Las diferentes alternativas estudiadas, recordémoslo, están divididos en dos grandes grupos, los materiales primarios (vírgenes) y materiales secundarios (reciclados) son: PET, vidrio y aluminio.

La comparación global entre ambos grupos de materiales se presenta en la figura 8.19 que muestra el menú principal del software Decision Lab, el cual utiliza la metodología PROMETHEE-GAIA, con la alimentación de datos al programa:

	reversibilidad	Emisiones CO2	Energía real	Ganancia
Min/Max	Minimize	Minimize	Minimize	Maximize
Weight	1.2000	1.2085	1.1885	0.4029
Type	Linear	V-Shape	Linear	Usual
Q	5500.0000	-	2000.0000	-
P	52000.0000	8000.0000	137000.0000	-
S	-	-	-	-
Threshold Unit	Absolute	Absolute	Absolute	Absolute
Average	79390	5405	81132	5834
Standard Dev.	61321	4964	82515	2537
Unit	MJ/uf	Kg/u.f.	MJ/u.f.	\$/u.f.
PET prim.	146347	2922	85110	6912
Vidrio prim.	93581	12396	93162	6693
Aluminio prim.	151831	4366	233439	10018
PET sec.	13037	1864	12977	3745
Vidrio- sec.	53946	10661	53688	3443
Aluminio sec.	17595	218	8416	4195

Figura 8.19 Alimentación de datos a Decision Lab.

Las funciones de preferencia aplicadas en el software Decision Lab para la toma de decisiones en base al análisis multicriterio, son obtenidas a través de las comparaciones entre pares de datos en cada uno de los criterios. De igual manera el establecimiento de los parámetros de indiferencia y preferencia en cada una de las funciones, son resultados de dichos cálculos. Así, las funciones de preferencia para este trabajo son las siguientes:

Criterio	Función
Irreversibilidad	Tipo 5 (linear shape)
Emisiones de CO ₂	Tipo 3 (V-shape)
Energía real	Tipo 5 (linear shape)
Ganancia	Tipo 1 (usual)

En la toma de decisiones respecto al conjunto de alternativas y criterios analizados tanto para el caso de materiales primarios como secundarios, se obtuvo el siguiente ordenamiento:

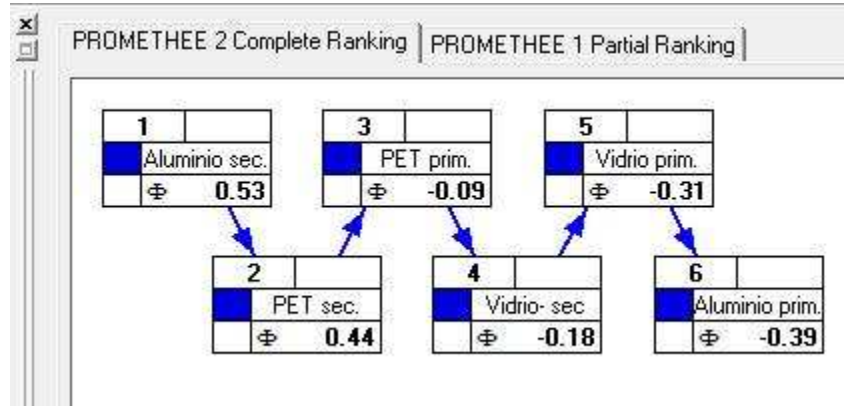


Figura 8.20 Ordenamiento PROMETHEE II para envases primarios y secundarios.

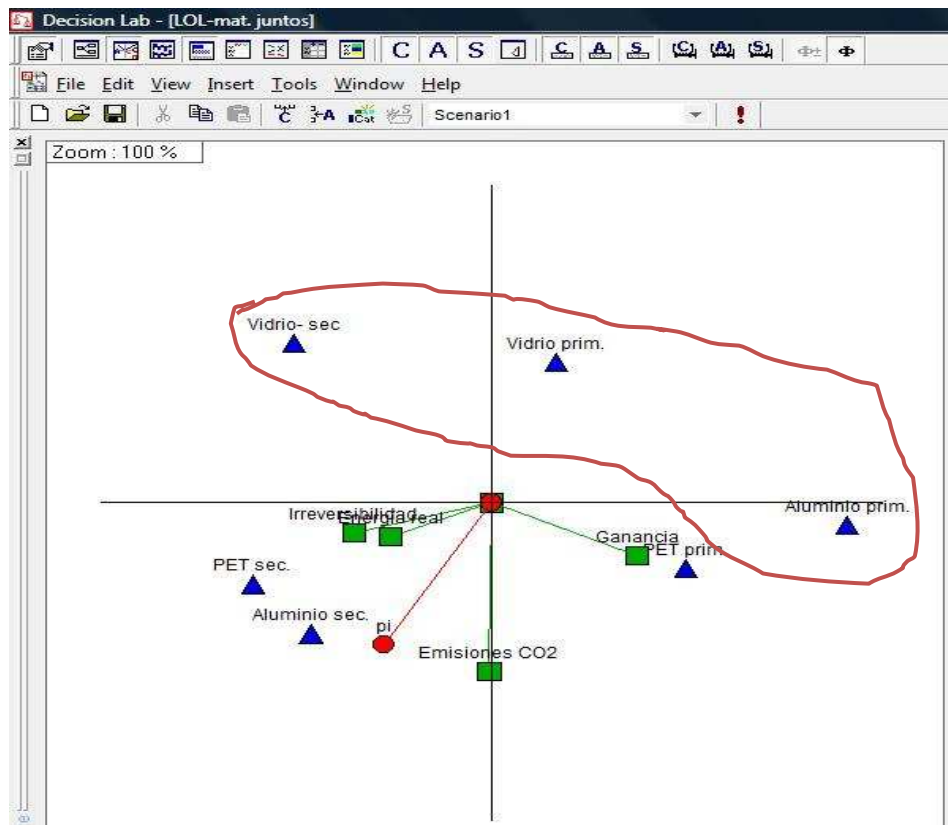


Figura 8.21 Plano GAIA para envases primarios y secundarios.

Como se observa en las dos últimas figuras, el reciclaje de envases post-consumo es el que tiene mayor jerarquía para cumplir con el objetivo de sustentabilidad conforme a los criterios aquí tratados al ubicarse en las dos primeras posiciones del ordenamiento obtenido por PROMETHEE II. En efecto, los dos mejores materiales a reciclar son las latas de aluminio y las botellas de PET, con este orden de prioridad. El reciclaje de vidrio no compite al presentar un número negativo de su flujo neto de preferencia.

En la figura 8.21 del plano GAIA se encuentran agrupadas en rojo las tres alternativas, vidrio secundario, vidrio primario y aluminio primario, que forman un agrupamiento diferente al de las otras alternativas, lejos del eje de decisión “pi. Por ello, fue necesario dividir el análisis en los dos grandes grupos a los que se ha hecho referencia.

De este modo, mediante el análisis multicriterio y la aplicación del software Decision Lab, se conjuntan primero el análisis para materiales primarios, obteniéndose el siguiente ordenamiento:

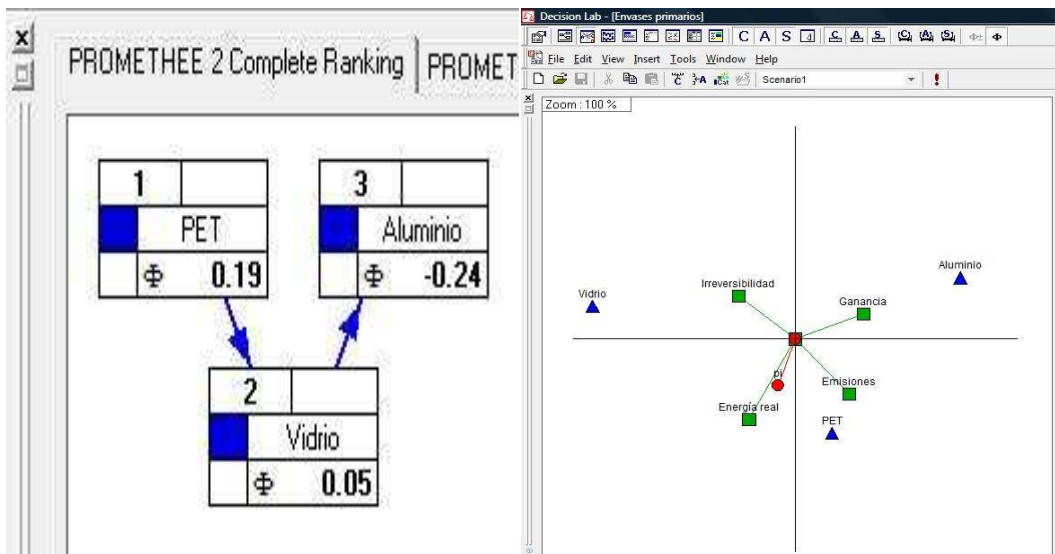


Figura 8.22 Ordenamiento PROMETHEE II y plano GAIA para envases primarios.

De acuerdo a esta jerarquización, las botellas de PET resultan ser la mejor opción en el grupo de los envases fabricados a partir de materiales vírgenes debido a que constituye la opción con mejor flujo neto para los criterios considerados. Asimismo, se puede observar que el resultado del flujo de preferencia neto para las latas de aluminio es negativo, por lo que, para este grupo dicho material no compite.

En cuanto a los envases de materiales secundarios el ordenamiento obtenido es el siguiente:

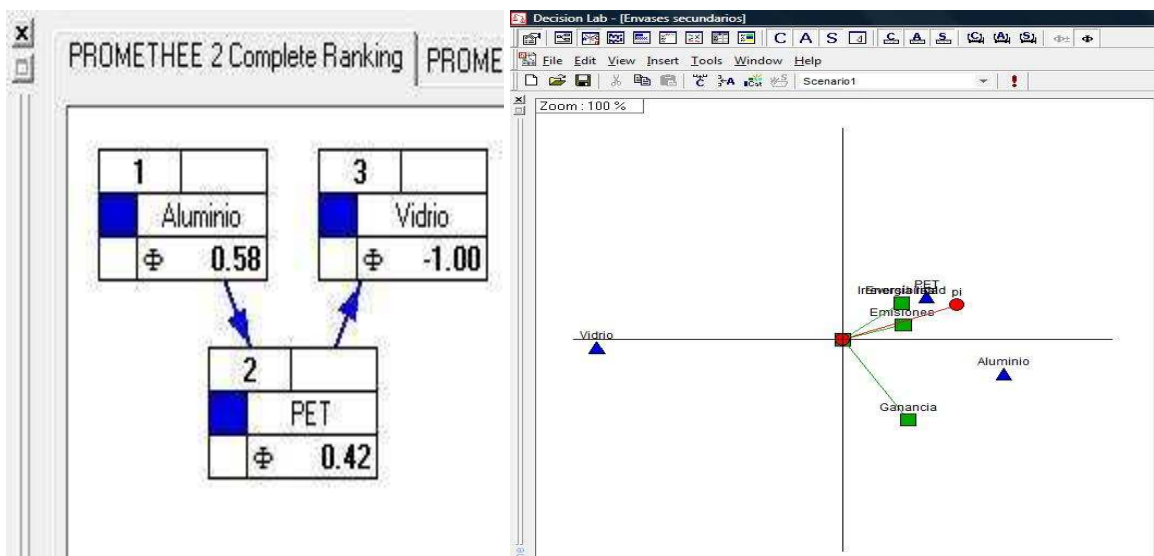


Figura 8.23 Ordenamiento PROMETHE II y plano GAIA para envases secundarios.

En el reciclaje como alternativa de tratamiento de envases post-consumo, las latas de aluminio constituyen el mejor material conforme a los criterios analizados, seguido por las botellas de PET, mientras que el vidrio en este grupo queda fuera de la competencia al resultar con un flujo neto de preferencia negativo.

Respecto de la sustitución de botellas de PET primario por botellas de vidrio primario, la diferencia de flujo neto de preferencia de las botellas fabricadas con vidrio primario y los flujos netos del aluminio y PET secundarios tienen una diferencia que no dejan lugar a duda que el ordenamiento de preferencia es: PET primario > aluminio secundario > PET secundario.

En efecto, el flujo neto del vidrio primario $\Phi=0.05$, mientras que los flujos de aluminio y PET secundarios respectivamente $\Phi=0.58$ y $\Phi=0.42$ siendo la diferencia respectivamente, de 0.53 a favor del aluminio secundario y de 0.37 a favor del PET secundario.

Por otra parte, también se consideró que el mercado de las botellas de vidrio tiene sus propios segmentos que están orientados principalmente, al envasado de jugos, vino, cervezas y conservas.

A partir de las anteriores soluciones con PROMETHEE, se puede establecer una combinación de diferentes estrategias de sustitución que tendrían que ser analizadas desde el punto de vista del abastecimiento de las materias primas (para el caso de los materiales reciclados) para cubrir una demanda. Para esta tesis se decidió plantear la siguiente estrategia:

- **Substituir la tasa anual de crecimiento de la demanda de botellas de PET primario de 10% (véase capítulo 6) en dos partes. A partir de 2016-2017 la mitad de la tasa de crecimiento (5%) por aluminio secundario y 5% por PET secundario, manteniendo constante hasta 2035, la misma cantidad de botellas de PET primario cuya demanda correspondería para 2016 a 731.5 miles de toneladas/año**

Para fines ilustrativos se presenta la siguiente tabla en donde se encuentra la demanda estimada de botellas de PET hasta el año 2035 y la sustitución por aluminio y PET secundarios de la tasa de crecimiento de la demanda:

Año	Demanda de botellas de PET (Ton/año)	Substitución total (Ton/año)
2016	731,470	-
2021	1,178,040	107,094
2026	1,897,246	172,477
2030	2,777,758	252,523
2035	4,473,607	406,692

En la 8.37 se indican los valores de irreversibilidad, la energía consumida y el CO_{2eq} emitido a la atmósfera sin que ocurra la estrategia de la sustitución antes mencionada. Esta tabla deberá ser comparada con la tabla 8.38 que contiene los valores de irreversibilidad, la energía consumida y el CO₂ eq correspondiente a la estrategia con sustitución.

Año	Irreversibilidad (Millones de bpce)	Energía (Millones de bpce)	Emisiones (Millones de toneladas de CO _{2eq})
2021	28.9	14.6	6.5
2026	46.5	23.5	10.5
2030	68.2	34.4	15.4
2035	109.8	55.4	24.8

Para terminar, y con la intención que esta tesis tiene, se presentan como conclusiones la situación que condujo desde el principio del objetivo y sus respectivas hipótesis, a elegir las irreversibilidades durante toda la cadena de producción, como una clase de energía que no

puede mejorarse desde el punto de vista de la eficiencia energética; la energía real utilizada en todos los procesos de manufactura, igualmente desde el origen de la materias primas hasta el producto terminado (las botellas) y las emisiones de GEI a través de la cadena de procesos.

Puede observarse que de no haber sustitución de las botellas fabricadas con PET virgen, la energía desperdiciada en términos de irreversibilidad, en el 2035, sería de 109.8 millones de barriles de petróleo crudo equivalente, manifestando la ineficiencia energética. Por otra parte, la energía utilizada para la manufactura sería de 55.4 millones de bpce en el mismo año y que las emisiones de CO₂, alcanzarían un monto de 24.8 millones de ton equivalentes para el mismo año.

En la tabla 8.38 se muestran las irreversibilidades, la energía consumida y la cantidad de CO₂eq. emitido, a la atmósfera que sería **evitados** gracias a la estrategia de sustitución ya mencionada contabilizando las cantidades correspondientes (de irreversibilidad, energía y CO₂eq) propias de los materiales sustitutos.

Tabla 8.38 Irreversibilidad, Energía y Ton CO ₂ eq. con y sin sustitución.						
	Irreversibilidad (millones bpce)		Energía (millones de bpce)		Millones de ton CO ₂ eq	
	Sin Sustitución	Con Sustitución	Sin Sustitución	Con Sustitución	Sin Sustitución	Con Sustitución
2021	28.9	26.20	14.6	13.31	6.5	5.94
2026	46.5	42.15	23.5	21.39	10.5	9.59
2030	68.2	61.82	34.4	31.31	15.4	14.07
2035	109.8	99.52	55.4	50.43	24.8	22.66

Puede observarse al comparar las tablas 8.37 y 8.38, que para 2035, las irreversibilidades disminuirían en 10.28 millones de bpce; que la energía consumida para la elaboración de los dos materiales secundarios, sería de 4.97 millones de bpce menor, y que la contaminación con GEI disminuiría en 2.14 millones de Ton de CO₂eq.

En las figuras 8.24 a 8.26, se presentan gráficos con los valores de la tabla 8.38 para irreversibilidades, energía consumida y toneladas de CO₂eq, respectivamente.

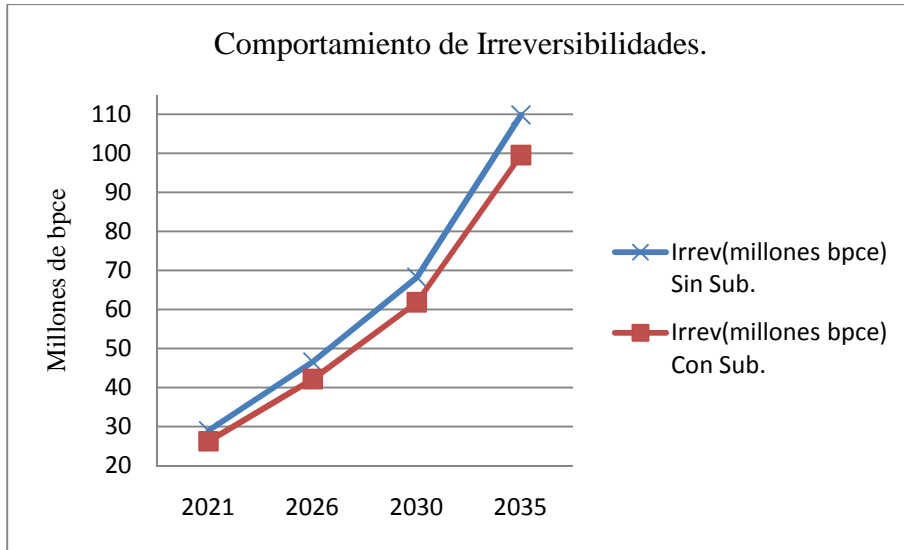


Figura 8.24 Comportamiento de irreversibilidades.

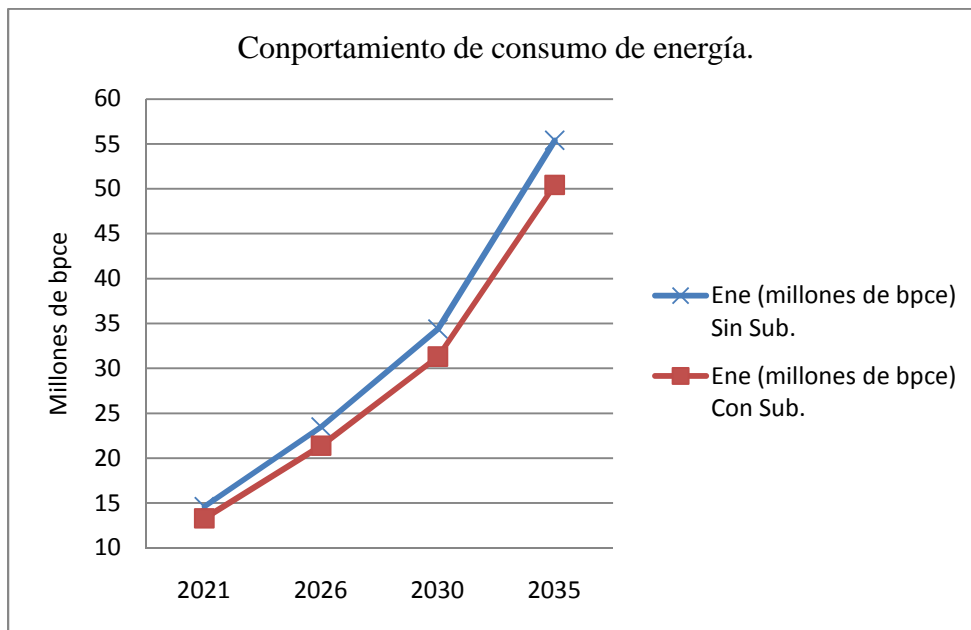


Figura 8.25 Comportamiento del consumo de energía.

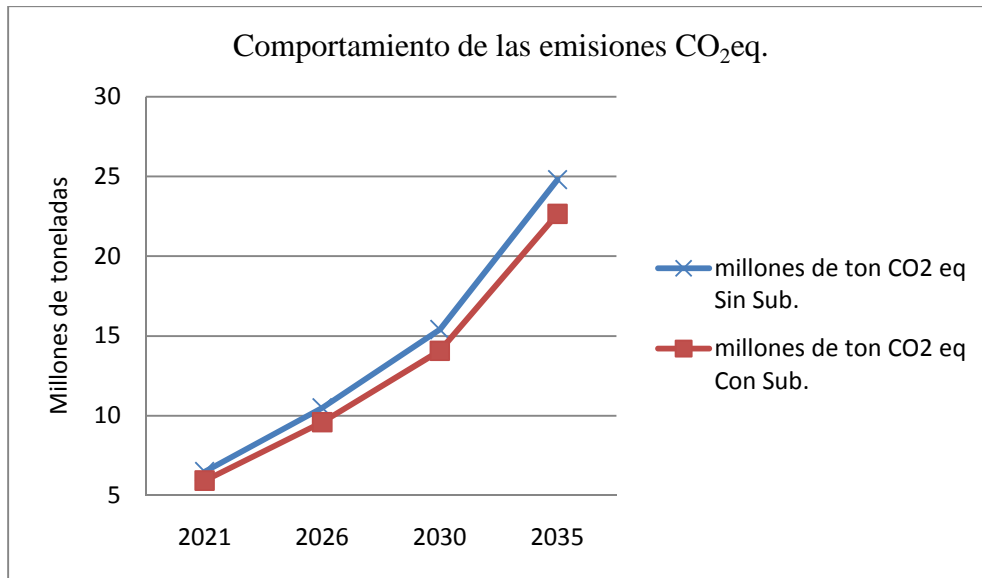


Figura 8.26 Comportamiento de las emisiones de CO₂eq.

En las tres gráficas anteriores se observa el comportamiento de reducción obtenido a través de la estrategia de sustitución de botellas de PET primario planteada.

Con estas comparaciones, quedan demostradas las hipótesis que respaldan los objetivos de la presente tesis, lo cual se presenta en el siguiente apartado de *Conclusiones*.

CONCLUSIONES

La necesidad de alcanzar un desarrollo sustentable es cada vez mayor alrededor del mundo, sobre todo en los países desarrollados, como más apremiante es la conservación de los recursos no-renovables. Por ello es necesario aumentar el número de estudios de sustentabilidad, que además requieren una extensa difusión para que haya una aplicación real de sus conclusiones. Se pretende que esta tesis constituya uno de esos estudios.

Esta tesis tuvo por objetivo la búsqueda y análisis del ciclo de vida exergético de las botellas de PET y sus posibles substitutos para lograr un uso eficiente de energía en términos de conservación de recursos naturales no renovables y las consecuencias ecológicas derivadas de la emisión de GEI, principalmente CO₂. Este objetivo fue cumplido cabalmente, ya que por medio de los resultados del análisis de exergía se obtuvieron las irreversibilidades, mismas que miden indirectamente la eficiencia energética de los procesos y productos motivo de estudio. A través de los balances de energía para cada etapa de la producción, se calculó la energía consumida.

Con ello, se realizaron las comparaciones pertinentes para la toma de decisiones respecto a la mejor estrategia que contribuya al desarrollo sustentable para el caso de los materiales destinados al envasado de agua principalmente.

Asimismo, las hipótesis originales fueron comprobadas ya que:

- a) Fue factible realizar el análisis de sustentabilidad a través de irreversibilidades, energía consumida y la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el ciclo de vida de las botellas de PET.
- b) Mediante balances de materia, energía y exergía fue factible medir la cantidad de recursos no renovables utilizados en las etapas de manufactura de PET.
- c) El reciclaje de los materiales de envasado constituye una alternativa tecnológica para el uso eficiente y sustentable de energía en el ciclo de vida completo de las botellas de PET.
- d) Los criterios considerados se cuantificaron, clasificaron y jerarquizaron para el análisis de sus repercusiones en la eficiencia energética, económica y ambiental a largo plazo.
- e) Se comprobó que existen alternativas de sustitución del PET primario por latas de aluminio y PET secundarios, a los cuales se les aplicó la misma metodología para llevar a cabo las comparaciones correspondientes.

Otra importante contribución de esta tesis, se refiere a la manera en que se tomaron las decisiones concernientes a los materiales a utilizar para la contención de agua. En efecto, la utilización de los métodos con criterios múltiples constituyó una herramienta importante para evaluar las diferentes alternativas de envasado de agua que incluyeron materiales primarios o vírgenes y materiales reciclados o secundarios. Los criterios aplicados en la metodología tienen un enfoque sistémico y son de carácter integral con el objetivo de que los resultados presentados, así como la respectiva toma de decisiones se encuentren soportados en fundamentos científicos confiables que pueden servir para futuros trabajos.

En efecto, los resultados, consistentes en darle la máxima prioridad a los resultados de irreversibilidades, consumo de energía y GEI proveniente de fuentes primarias a través de toda la cadena petroquímica y a reciclados, condujo a la creación de una estrategia de sustitución congruente con los resultados del método multicriterio empleado, incluyendo como un criterio económico la ganancia del producto final.

Ninguna publicación ha tomado en cuenta la posibilidad de decidir la sustitución a través de una estrategia -entre varias que se podrían haber formulado- utilizando como ayuda a la toma de decisiones los métodos multicriterio.

Para tener un panorama del creciente aumento en los mercados mundiales de la demanda de botellas de PET, principalmente utilizadas para envasar agua, basta con mencionar que en nuestro país se consumieron 9.75 miles de millones de botellas en el año 2009, equivalentes a 375,360 toneladas de PET. La mayor parte de estas botellas, el 95.5 %, fueron tiradas en los basureros generando contaminación de suelos.

No obstante, la utilización del reciclaje de botellas, tiene diferentes problemas; en efecto, entre los más importantes se encuentra la concientización a la población de no tirar las botellas en los basureros y por supuesto aún menos en la vía pública. Es por lo tanto, un problema de cultura seguido por los avatares que representa la recolección de estas botellas.

Lo anterior, no es motivo, sin embargo, para despreciar esta opción: la del reciclaje. Existe otra opción que no fue analizada íntegramente y es la de utilizarlas en incineradores con lo cual se podría generar electricidad. Por lo tanto, se propone la realización de un estudio a profundidad de esta última alternativa.

La cuantificación de los efectos en la contaminación atmosférica respecto a la energía utilizada en la producción de envases fueron logrados de manera satisfactoria en cada caso considerado, dada la relevancia de este tema en los indicadores del desarrollo sustentable.

Los márgenes de ganancias económicas en la producción primaria y secundaria de envases proporcionada, son estimaciones realizadas a partir de distintas fuentes debido al carácter confidencial propio de este tipo de información así como de la informalidad que caracteriza al mercado del reciclaje en nuestro país. Asimismo, en México existe toda una red de trabajadores informales que intervienen en el proceso de recolección, acopio y segregación de los materiales reciclables contenidos en la basura, y que por supuesto tienen influencia en las condiciones de mercado, misma que hasta el momento no se encuentra determinada.

El Análisis de Ciclo de Vida en conjunción con el concepto de *exergía*, constituye una herramienta de gran utilidad para el estudio y la búsqueda del desarrollo sustentable ya que la intersección entre ambas reúne los elementos necesarios tanto para el cuidado del medio ambiente como la conservación de recursos naturales no renovables.

Conforme al establecimiento de la unidad funcional, las latas de aluminio son los envases con mayor exergía química (76,295 MJ/u.f.), quedando las botellas de PET en un segundo lugar (23,705 MJ/u.f.) y el vidrio se ubica como el material con menor contribución exergética (2,582 MJ/u.f.). De lo anterior se asume la importancia en la recuperación de los dos primeros materiales al constituir materiales de alto valor en exergía.

La irreversibilidad en la producción primaria de botellas de PET se debe en un 41% a la refinación de crudo para la obtención de xilenos, lo cual la convierte en la etapa con mayor irreversibilidad dentro de dicha producción. En la producción de botellas de vidrio la irreversibilidad más alta corresponde al proceso de fundición contribuyendo con un 50% del total; mientras que en la fabricación de latas de aluminio la electrólisis tiene una contribución del 60% considerando el mismo criterio.

En cuanto a emisiones de CO₂ en la producción de materiales vírgenes, el vidrio es el material con mayor irreversibilidad seguido del aluminio y ubicándose la producción de botellas de PET como el proceso con menor emisión de este gas contaminante de acuerdo a la unidad funcional planteada.

El reciclaje de los tres materiales para envasado reduce en gran medida las irreversibilidades respecto a la producción a partir de materias primas vírgenes, lo cual coloca al reciclaje como una opción fundamental para un uso eficiente de energía y

conservación de recursos no renovables, dada la disminución en la explotación de minerales e hidrocarburos.

Al contrario que la producción primaria, el aluminio se convierte, a través del reciclaje en el material secundario con menor irreversibilidad debido principalmente a la cantidad de energía que se ahorra por concepto del proceso electrolítico de la producción primaria.

La ganancia económica que representa la producción de envases primarios es mayor que la obtenida a través del reciclaje, lo cual significa un obstáculo clave en el crecimiento de esta industria.

Gracias al análisis multicriterio PROMETHEE-GAIA se pudo obtener un ordenamiento *total* del desempeño de cada uno de los materiales de envasado en conjunto, mediante el vector resultante del eje de decisiones correspondiente a los criterios establecidos, en lugar de efectuar comparaciones individuales de cada criterio que conducirían a un ordenamiento parcial (con óptimos de Pareto), que no es deseable para decidir.

En México, el concepto de exergía como medida del uso eficiente de energía, tiene que ser reforzado por políticas efectivas que constituyan el puente entre la ciencia, la ingeniería, la tecnología y los planes gubernamentales proyectados para una menor dependencia energética y a una economía sana, ya que hasta el momento este concepto sólo ha sido explotado, aprovechado y aplicado en mayor medida en países europeos.

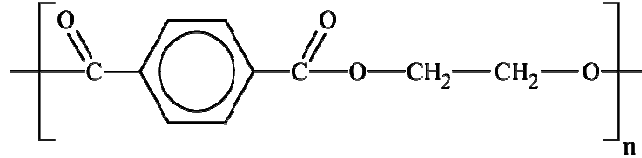
Se debe señalar que los envases no son propiamente el problema de raíz, sino el uso tan corto que se le da y su consecuente disposición en aumento del volumen de los basureros, sin proporcionarles los tratamientos post-consumo apropiados para la continuidad de su aprovechamiento de acuerdo a las propiedades de cada tipo de envase en particular.

En nuestro país la falta de infraestructura apropiada para la recolección y acarreo de residuos sólidos urbanos, además de incrementar los costos del reciclaje, provoca que éstos se contaminen en mayor medida respecto a las condiciones que tendrían si se depositaran en contenedores adecuados, con lo cual se dificulta el reciclaje y se obtiene una menor calidad del producto final reciclado.

APÉNDICE A
CÁLCULOS

Cálculos de exergía química de compuestos (Capítulo 8, sección 8.1)

Exergía química del PET y sus materias primas principales:



$$\text{Peso molecular}_{PET} = 192 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Carbono} = \frac{120}{192} = \frac{5}{8}$$

$$\text{Fracción mol de Hidrógeno} = \frac{8}{192} = \frac{1}{24}$$

$$\text{Fracción mol Oxígeno} = \frac{64}{192} = \frac{1}{3}$$

Aplicando la ecuación 3.22 tenemos:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \left(\frac{1/24}{5/8} \right) + 0.0432 \left(\frac{1/3}{5/8} \right) = 1.07466$$

Aplicando la ecuación 3.23 para obtener el Poder Calorífico Neto del PET se obtiene:

$$PCN = 34.8 \left(\frac{5}{8} \right) + 93.8 \left(\frac{1}{24} \right) - 10.8 \left(\frac{1}{3} \right) = 22.058 \frac{MJ}{Kg_{PET}}$$

Por lo tanto, a través de la ecuación 3.21 se tiene que el valor de la exergía química del PET es:

$$e_{ch}^0 = (\varphi)(PCN)$$

$$e_{ch}^0 = (1.07466) \left(22.058 \frac{MJ}{Kg_{PET}} \right) = 23.705 \frac{MJ}{Kg_{PET}}$$

Exergía química del etilenglicol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$):

Aplicando las mismas ecuaciones que para el caso del PET (3.22, 3.23 y 3.21) se obtiene que el valor de exergía química del etilenglicol es:



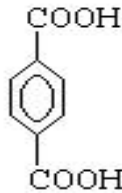
$$\text{Peso molecular}_{\text{Etilenglicol}} = 62 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}$$

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \left(\frac{2/62}{24/62} \right) + 0.0432 \left(\frac{32/62}{24/62} \right) = 1.1409$$

$$\text{PCN} = 34.8 \left(\frac{24}{62} \right) + 93.8 \left(\frac{6}{62} \right) - 10.8 \left(\frac{32}{62} \right) = 16.974 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Etilenglicol}}}$$

$$e_{ch}^{\circ} = (\varphi)(\text{PCN}) = (1.1409) \left(16.974 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Etilenglicol}}} \right) = 19.366 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Etilenglicol}}}$$

Exergía Química Estándar del Ácido Tereftálico ($\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$):



$$\text{Peso molecular}_{\text{Ác.Teref.}} = 166 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}$$

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \left(\frac{6/166}{96/166} \right) + 0.0432 \left(\frac{64/166}{96/166} \right) = 1.079$$

$$\text{PCN} = 34.8 \left(\frac{96}{166} \right) + 93.8 \left(\frac{6}{166} \right) - 10.8 \left(\frac{64}{166} \right) = 19.352 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Ác.Teref.}}}$$

$$e_{ch}^{\circ} = (\varphi)(\text{PCN}) = (1.079) \left(19.352 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Ác.Teref.}}} \right) = 20.88 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}_{\text{Ác.Teref.}}}$$

Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Bióxido de Carbono (CO₂):

$$\text{Peso molecular}_{CO_2} = 44 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Carbono} = \frac{12}{44} = 0.2727$$

$$\text{Fracción mol de Oxígeno} = \frac{32}{44} = 0.7272$$

$$e_{CO_2}^o = \Delta G_f^o + \sum_i (n_{el."i"}) * (e_{el."i"})$$

$$e_{CO_2}^o = \left(-8,963 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.2727 * 34,188 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.7272 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{CO_2}^o = 450.24 \frac{KJ}{Kg_{CO_2}} = 0.450 \frac{MJ}{Kg_{CO_2}}$$

Monóxido de Carbono (CO):

$$\text{Peso molecular}_{CO} = 28 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Carbono} = \frac{12}{28} = 0.4285$$

$$\text{Fracción mol de Oxígeno} = \frac{16}{28} = 0.5714$$

$$e_{CO}^o = \Delta G_f^o + \sum_i (n_{el."i"}) * (e_{el."i"})$$

$$e_{CO}^o = \left(-4897 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.4285 * 34,188 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.5714 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{CO}^o = 9,823.41 \frac{KJ}{Kg_{CO}} = 9.823 \frac{MJ}{Kg_{CO}}$$

Bióxido de Azufre (SO₂):

$$\text{Peso molecular}_{SO_2} = \left(32 \frac{g}{gmol}\right) + (2) \left(16 \frac{g}{gmol}\right) = 64 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Azufre} = \frac{32}{64} = 0.5$$

$$\text{Fracción mol de Oxígeno} = \frac{32}{64} = 0.5$$

$$e_{SO_2}^o = \Delta G_f^o + \sum_i (n_{el."i"}) * (e_{el."i"})$$

$$e_{SO_2}^o = \left(-4,689 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.5 * 19,050 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.5 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{SO_2}^o = 4,898 \frac{KJ}{Kg_{SO_2}} = 4.898 \frac{MJ}{Kg_{SO_2}}$$

Bióxido de Nitrógeno (NO₂):

$$\text{Peso molecular}_{NO_2} = 46 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Nitrógeno} = \frac{14}{46} = 0.304$$

$$\text{Fracción mol de Oxígeno} = \frac{32}{46} = 0.695$$

$$e_{NO_2}^o = \Delta G_f^o + \sum_i (n_{el."i"}) * (e_{el."i"})$$

$$e_{NO_2}^o = \left(1,114 \frac{KJ}{Kg_{NO_2}}\right) + \left[\left(0.304 * 25.714 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.695 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{NO_2}^o = 1,207.99 \frac{KJ}{Kg_{NO_2}} = 1.208 \frac{MJ}{Kg_{NO_2}}$$

Metano (CH₄):

$$\text{Peso molecular}_{CH_4} = \left(12 \frac{g}{gmol}\right) + (4) \left(1 \frac{g}{gmol}\right) = 16 \frac{g}{gmol}$$

$$\text{Fracción mol de Carbono} = \frac{12}{16} = 0.75$$

$$\text{Fracción mol de Hidrógeno} = \frac{4}{16} = 0.25$$

$$e_{CH_4}^o = \Delta G_f^o + \sum_i (n_{el."i"}) * (e_{el."i"})$$

$$e_{CH_4}^o = \left(-3,175 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.75 * 34,188 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.25 * 118,050 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{CH_4}^o = 51,978 \frac{KJ}{Kg_{CH_4}} = 51.978 \frac{MJ}{Kg_{CH_4}}$$

Balance de materia del proceso de producción de PET primario

(Capítulo 8, sección .8.1.1)

Cálculos para producción de Ácido Tereftálico a partir de crudo.

A partir de los Coeficientes Insumo-Producto (CIP) se obtiene:

$$\left(\frac{0.86748 \text{Ton ácido tereftálico}}{\text{Ton PET}}\right) \left(\frac{0.70785 \text{Ton } p - \text{xileno}}{\text{Ton ácido tereftálico}}\right) = 0.6140 \frac{\text{Ton } p - \text{xileno}}{\text{Ton PET}}$$

$$\left(0.6140 \frac{\text{Ton } p - \text{xileno}}{\text{Ton PET}}\right) \left(1.29538 \frac{\text{Ton xilenos}}{\text{Ton } p - \text{xileno}}\right) = 0.7954 \frac{\text{Ton xilenos}}{\text{Ton PET}}$$

En base a estos cálculos la cantidad requerida de xilenos para la obtención de 1 tonelada de Poli (Tereftalato de Etileno) es 795 Kg/u.f. para los cuales el crudo necesario es:

$$\frac{795 \text{ Kg/u.f.}}{* 0.048} = 16,562 \text{ Kg/u.f.} = 16.562 \frac{\text{ton. eq. crudo}}{\text{u.f.}}$$

* Porcentaje de xilenos obtenidos a partir de la configuración de la refinería: 4.8 %

La equivalencia a barriles de petróleo crudo equivalente (bpce) es:

$$16,562 \text{ Kg. crudo} \left(\frac{1 \text{ m}^3 \text{ crudo}}{920 \text{ Kg. crudo}}\right) = \frac{18 \text{ m}^3_{\text{crudo}}}{\text{u.f.}}$$

$$18 \frac{m_{crudo}^3}{u.f.} \left(\frac{1 bpce}{0.159 m_{crudo}^3} \right) = 113.207 \frac{bpce}{u.f.}$$

Exergías del proceso completo de Refinación.

A partir del valor exergético de cada petroquímico producido en la refinería y mediante los rendimientos de producción en la misma se tienen las siguientes de exergías a la salida del proceso de refinación:

Tabla 1. Exergías a la salida del proceso de refinación.			
Petroquímico	Exergía del compuesto (MJ/Kg)	Kg. producidos/u.f.	Exergía de producto (MJ/u.f.)
Etileno	48.52	3130.3125	151882.762
Propileno	48.549	2136.5625	103727.972
Butadieno	43.9	513.4375	22539.906
Benceno	42.292	877.8125	37124.446
Tolueno	43.231	712.1875	30788.577
Xilenos	43.238	795	34374.21
Gasolina	46.65	1391.25	64901.812
Turbosina	46.175	748.625	34567.759
Diesel	46.65	1122.9375	52385.034
Combustóleo	43.8	1871.5625	81974.437
		Total:	614,266.919

Cálculos para obtención de etilenglicol a partir de Gas Natural:

A partir de los Coeficientes Insumo-Producto (CIP) se obtiene:

$$\left(\frac{0.33846 \text{ Ton. Etilenglicol}}{\text{Ton. PET}} \right) \left(\frac{0.7493 \text{ Ton. Óxido de etileno}}{\text{Ton. Etilenglicol}} \right) = 0.253 \frac{\text{Ton. óx. et.}}{\text{Ton. PET}}$$

$$\left(0.253 \frac{\text{Ton. óxido de etileno}}{\text{Ton. PET}} \right) \left(0.8812 \frac{\text{Ton. Etileno}}{\text{Ton. óxido de etileno}} \right) = 0.222 \frac{\text{Ton. etileno}}{\text{Ton. PET}}$$

$$\left(0.222 \frac{\text{Ton. etileno}}{\text{Ton. PET}} \right) \left(1.2342 \frac{\text{Ton. etano}}{\text{Ton. etileno}} \right) = 0.273 \frac{\text{Ton. etano}}{\text{Ton. PET}} = 0.273 \frac{\text{Ton. etano}}{u.f.}$$

Por lo tanto, la cantidad requerida de etano para la producción de una unidad funcional de Poli (Tereftalato de Etileno) es 273 Kg. para cuya obtención a partir de Gas Natural Húmedo se necesitan los siguientes datos:

- Obtención de etano a partir del Gas Natural Húmedo (GNH): 38.39 bl/MMft³ (barriles de etano/millón de pies cúbicos de Gas Natural Húmedo).
- Densidad del etano: 1212 Kg/m³

Por lo tanto, el Gas Natural Húmedo requerido para una unidad funcional de PET es:

$$\left(38.39 \frac{\text{bl. etano}}{\text{MMft}^3 \text{GNH}}\right) \left(1212 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^3}\right) \left(0.159 \frac{\text{m}^3}{\text{bl.}}\right) = 7,398 \frac{\text{Kg. etano}}{\text{MMft}^3 \text{GNH}}$$

$$\frac{\left(273 \text{ Kg. etano} / \text{u. f.}\right) (1 \text{ MMft}^3 \text{ GNH})}{7398 \text{ Kg etano}} = 36,901.86 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{u. f.}}$$

En la siguiente tabla se desglosa la producción completa de la planta criogénica:

Tabla 2. Producción de la planta criogénica.			
barriles de etano/MMft3:	38.39	barriles de n-pentano/MMft3:	4.28
Densidad del etano (Kg/m3):	1212	Densidad del n-pentano(Kg/m3):	630
Kg. Etano/MMft3:	7398.060	Kg. n-pentano/MMft3:	428.728
Kg etano producidas	273.002	Kg. n-pentano producidas	15.821
barriles de propano/MMft3:	31.88	barriles de i-pentano/MMft3:	3.61
Densidad del propano (Kg/m3):	1.83	Densidad del i-pentano(Kg/m3):	630
Kg. Propano/MMft3:	9.276	Kg. i-pentano/MMft3:	361.614
Kg. propano producidas	0.342	Kg. i-pentano producidas	13.344
barriles de n-butano/MMft3:	13.08	barriles de C6+/MMft3:	3.34
Densidad del n-butano (Kg/m3):	2.52	Densidad de C6+(Kg/m3):	654.8
Kg. n-butano/MMft3:	5.241	Kg. C6+/MMft3:	347.738
Kg. n-butano producidas	0.193	Kg. C6+ producidas:	12.832
barriles de i-butano/MMft3:	5.32		
Densidad del i-butano (Kg/m3):	2.52		
Kg. i-butano/MMft3:	2.132		
Kg. i-butano producidas	0.079		

Respecto al metano, se sabe que en la planta criogénica a partir de una alimentación igual a 4,791 millones de ft³/día de Gas Natural Húmedo, se obtienen 3,620 millones de ft³/día de Gas Seco (CH₄) por lo que el rendimiento equivale a 75.558%, con lo anterior se calcula la

cantidad producida de metano en una carga de 1 millón de ft³ de Gas Natural Húmedo (GNH):

$$1 \text{ MMft}^3 \text{ G.N.H} * 0.75558 = 755,580 \frac{\text{ft}^3 \text{CH}_4}{\text{MMft}^3 \text{ G.N.H}}$$

La conversión de este resultado a m³ es:

$$\left[755,580 \frac{\text{ft}^3 \text{CH}_4}{\text{MMft}^3 \text{ G.N.H}} \right] * \left[\frac{0.028 \text{ m}^3}{\text{ft}^3} \right] = 21,156.335 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{MMft}^3 \text{ G.N.H}}$$

Por lo tanto, la cantidad de Gas Seco (CH₄) producido en la planta criogénica en relación a la unidad funcional planteada es:

$$\left[21,156.335 \frac{\text{m}^3 \text{Gas seco}}{\text{MMft}^3 \text{ G.N.H}} \right] * \left[36,901.86 \frac{\text{ft}^3 \text{ G.N.H}}{\text{u.f.}} \right] * \left[\frac{\text{MMft}^3 \text{ G.N.H}}{1 \times 10^6 \text{ ft}^3 \text{ G.N.H}} \right] \\ = 780.708 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{u.f.}}$$

Utilizando el valor de densidad del metano, se tiene que la cantidad producida de este alcano en la planta criogénica conforme a la unidad funcional igual a:

$$\left[780.708 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{u.f.}} \right] * \left[0.717 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] = 559.768 \frac{\text{Kg}}{\text{u.f.}}$$

Por último la exergía producida en la planta criogénica por unidad funcional por concepto de Gas Seco (CH₄) es igual a:

$$e_{\text{gas seco}} = \left[\frac{\text{ton. producidas}}{\text{u.f.}} \right] * \left[\text{exergía del gas seco} \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{MJ}}{\text{u.f.}} \\ e_{\text{Gas seco}} = \left[\frac{0.55976 \text{ ton}_{\text{gas seco}}}{\text{u.f.}} \right] * \left[52,144 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right] = 29,188.54 \frac{\text{MJ}}{\text{u.f.}}$$

Exergías del procesamiento de Gas Natural Húmedo.

Una vez calculada la producción de hidrocarburos en el procesamiento de Gas Natural Húmedo, se pueden conocer las respectivas exergías como lo muestra en resumen la siguiente tabla:

Tabla 3. Exergías a la salida del procesamiento de Gas Natural Húmedo.			
Hidrocarburo	Exergía del compuesto (MJ/ton)	Ton. producidas/u.f.	Exergía de producto (MJ/u.f.)
Metano	52,144	0.559	29,188.54
Etano	50,031	0.273	13,658.46
Propano	49,058	0.000342	16.78
n-butano	48,262	0.000193	9.31
iso-butano	48,262	0.000079	3.81
n-pentano	48,194	0.015821	762.48
iso-pentano	48,194	0.013344	643.10
Hexano (C ₆₊)	47,747	0.012832	612.69
		Total:	44,895.18

Balance de energía de la producción de PET primario (Capítulo 8, sección 8.1.2)

Refinería.

Consumo total de energía en la refinería “Miguel Hidalgo” [91]: 11, 714,489 GCal/año para un procesamiento de 105,667.5 Mbl /año.

$$\left[11,714,489 \frac{GCal}{año} \right] \left[\frac{4.18 GJ}{1GCal} \right] = 48,966,564 \frac{GJ}{año}$$

La energía consumida en la refinación para la producción de PET conforme a la unidad funcional es:

$$\frac{\left(48,966,564 \frac{GJ}{año} \right) \left(113.207 \frac{bl}{u.f.} \right)}{\left(105,667,500 \frac{bl}{año} \right)} = 52.457 \frac{GJ}{u.f.} = 52,457 \frac{MJ}{u.f.}$$

La equivalencia a barriles de petróleo de esta cantidad de energía es:

$$\left[52,457 \frac{MJ}{u.f.} \right] \left[\frac{bpce}{5,960 MJ} \right] = 8.8 \frac{bpce}{u.f.}$$

Planta criogénica.

Consumo total de energía en la planta “Nuevo PEMEX” [91]: 8, 429,074 GCal/año para un procesamiento de 240,170 MMft³ /año.

$$\left[8,429,074 \frac{GCal}{año} \right] \left[\frac{4.18 GJ}{1GCal} \right] = 35,233,529 \frac{GJ}{año}$$

$$\frac{\left(35,233,529 \frac{GJ}{\text{año}}\right) \left(36,901.86 \frac{ft^3 GNH}{u.f.}\right)}{\left(240,170 \times 10^6 \frac{ft^3 G.N.H}{\text{año}}\right)} = 5.413 \frac{GJ}{u.f.} = 5,413 \frac{MJ}{u.f.}$$

La equivalencia a barriles de petróleo de esta cantidad de energía es:

$$\left[5,413 \frac{MJ}{u.f.}\right] \left[\frac{bpce}{5,960 MJ}\right] = 0.9 \frac{bpce}{u.f.}$$

Cálculo de exergías químicas en la producción de PET primario

(Capítulo 8, sección 8.1.3)

Refinería:

Exergía Química producida: (masa del compuesto)*(exergía química del compuesto)

$$e_{\text{ác.teref.}}^o = \left(0.86748 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(20,890 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 18,121.657 \frac{MJ}{u.f.}$$

$$e_{p\text{-xileno}}^o = \left(0.6140 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(43,230 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 26,543.22 \frac{MJ}{u.f.}$$

$$e_{\text{xilenos}}^o = \left(0.7954 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(43,230 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 34,385.142 \frac{MJ}{u.f.}$$

Planta Criogénica:

Exergía Química en producida: (masa del compuesto)*(exergía química del compuesto)

$$e_{\text{etilenglicol}}^o = \left(0.33846 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(19,360 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 6,552.585 \frac{MJ}{u.f.}$$

$$e_{\text{óx.etileno}}^o = \left(0.253 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(25,880 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 6,547.64 \frac{MJ}{u.f.}$$

$$e_{\text{etileno}}^o = \left(0.222 \frac{\text{Ton}}{u.f.}\right) * \left(48,520 \frac{MJ}{\text{Ton}}\right) = 10,771.44 \frac{MJ}{u.f.}$$

$$e_{etano}^o = \left(0.273 \frac{Ton}{u.f.}\right) * \left(50,031 \frac{MJ}{Ton}\right) = 13,658.463 \frac{MJ}{u.f.}$$

Cálculo de exergía química de emisiones atmosféricas en la producción de PET primario

(Capítulo 8, sección 8.1.3)

Dióxido de Carbono (CO₂):

Emisión de CO₂: 2.922Kg /Kg PET=2,922Kg /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CO_2}^o = \left(2,922 \frac{Kg_{CO_2}}{u.f.}\right) * \left(0.45 \frac{MJ}{Kg_{CO_2}}\right) = 1315 \frac{MJ}{u.f.}$$

Monóxido de Carbono (CO):

Emisión de CO: 0.007436 Kg /Kg. PET = 7.436 Kg /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CO}^o = \left(7.436 \frac{Kg_{CO}}{u.f.}\right) * \left(9.823 \frac{MJ}{Kg_{CO}}\right) = 73.044 \frac{MJ}{u.f.}$$

Dióxido de Azufre (SO₂):

Emisión de SO₂: 0.0104 Kg /Kg. PET = 10.4 Kg /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{SO_2}^o = \left(10.4 \frac{Kg_{SO_2}}{u.f.}\right) * \left(4.898 \frac{MJ}{Kg_{SO_2}}\right) = 50.939 \frac{MJ}{u.f.}$$

Metano (CH₄):

Emisión de CH₄: 0.0189 Kg /Kg. PET = 18.9 Kg /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CH_4}^o = \left(18.9 \frac{Kg_{CH_4}}{u.f.} \right) * \left(51.978 \frac{MJ}{Kg_{CH_4}} \right) = 982.384 \frac{MJ}{u.f.}$$

Dióxido de Nitrógeno (NO₂):

Emisión de NO₂: 0.007189 Kg /Kg. PET = 7.189 Kg /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{NO_2}^o = \left(7.189 \frac{Kg_{NO_2}}{u.f.} \right) * \left(1.209 \frac{MJ}{Kg_{NO_2}} \right) = 8.692 \frac{MJ}{u.f.}$$

Cálculo de exergías por servicios auxiliares en la producción de PET primario.

(Capítulo 8, sección 8.1.3)

A continuación se presenta una descripción general del cálculo de la exergía por concepto de los servicios auxiliares en cada una de las etapas involucradas en la producción de PET primario. Los datos de entrada fueron obtenidos de los reportes de Process Economics Program (PEP) [92]:

a) Agua de enfriamiento

Dato de entrada: m³/ton. producto, a través del valor de densidad del agua, las unidades se convierten a Kg. agua/Kg. producto.

Exergía del agua: 0.05 MJ/Kg.

Por lo tanto, la exergía de entrada por concepto de agua de enfriamiento es:

$$exergía\ por\ agua\ de\ enfriamiento = \left[\frac{Kg.\ agua}{Kg.\ producto} \right] \left[0.05 \frac{MJ}{Kg.\ agua} \right] = \frac{MJ}{Kg.\ prod.}$$

b) Electricidad

Dato de entrada: KWh/ton. producto.

Factor de conversión: 3.6 MJ/KWh

La exergía por electricidad es igual a:

$$exergía\ por\ electricidad = \left[\frac{KWh}{ton.\ producto} \right] \left[3.6 \frac{MJ}{KWh} \right] = \frac{MJ}{ton.\ producto}$$

c) Gas Natural

Dato de entrada: Kcal/Kg. producto.

Sabiendo que:

$$1Kcal = 4.18 KJ$$

Tenemos que la exergía por gas natural es:

$$exergía\ por\ gas\ natural = \left[\frac{Kcal}{Kg.\ producto} \right] \left[\frac{4.18 KJ}{1 Kcal} \right] = \frac{KJ}{Kg.\ producto}$$

d) Vapor

Dato de entrada: ton. vapor / Kg. producto

El cálculo de exergía por vapor se calcula a partir de la ecuación 3.12:

$$e_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

Así, mediante los datos obtenidos de tablas de vapor termodinámicas para cada caso particular se obtiene que la exergía por vapor es:

$$exergía\ por\ vapor = \left[\frac{KJ}{Kg} \right] - 298 K \left[\frac{KJ}{Kg K} \right] = \frac{KJ}{Kg.\ producto}$$

En los tres primeros casos se puede observar que el valor de la exergía por servicios, corresponde propiamente al valor energético reportado, mientras que en el caso del vapor requerido, la exergía está dada por la ecuación 3.12.

A continuación se desglosa por medio de la siguiente serie de tabulaciones (tablas 4 a 10) los valores de exergía resultantes en cada una de las etapas que intervienen en la producción de PET primario en unidades de MJ/Kg de cada especie. En el capítulo 8 (Resultados) se presenta a un resumen de las exergías por servicios de la cadena de producción de este material conforme a la unidad funcional correspondiente:

Tabla 4 Exergía para la obtención de Ácido Tereftálico.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg. Ácido Tereftálico)
Agua de enfriamiento	11.35
Electricidad	0.5292
Gas Natural	8.84
Exergía (MJ/Kg Ácido Tereftálico) :	20.71

Tabla 5 Exergía para la obtención de p-xileno.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg. p-xileno)
Agua de enfriamiento	0.8
Electricidad	0.1332
Gas Natural	2.2613
Vapor	6.3498
Exergía (MJ/Kg p-xileno) :	9.54

Tabla 6 Exergía para la obtención de Etilenglicol.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg. EG)
Agua de enfriamiento	6.5
Electricidad	0.0396
Vapor	-0.5060
Exergía (MJ/Kg Etilen Glicol):	6.033

Tabla 7 Exergía para la obtención de Óxido de Etileno.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg.óxido de etileno)
Agua de enfriamiento	14.65
Agua de proceso	0.95
Electricidad	2.934
Vapor	-0.5158
Exergía (MJ/Kg Oxido de etileno) :	18.018

Tabla 8 Exergía para la obtención de Etileno.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg. Etileno)
Agua de enfriamiento	8.35
Agua de proceso	0.075
Electricidad	0.1044
Gas Natural	13.823
Exergía (MJ/Kg. Etileno) :	22.352

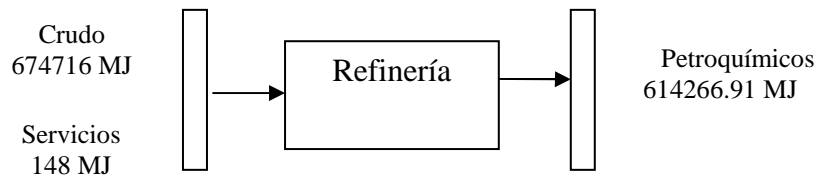
Tabla 9 Exergía para la obtención de PET primario a partir de sus materias primas.	
Servicio	Exergía (MJ/Kg.PET)
Agua de enfriamiento	2.3
Electricidad	0.364
Gas Natural	2.295
Vapor	0.239
Exergía (MJ/Kg PET) :	5.198

Tabla 10 Exergía en la fabricación de botellas de PET.	
Servicios	Exergía (MJ/u.f.)
Agua enfriamiento	6500
Electricidad	4680
Exergía (MJ/u.f)	11,180

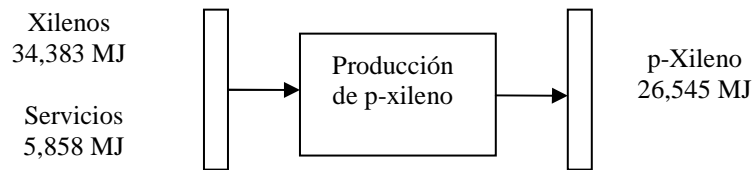
Cálculo de irreversibilidades en la producción de botellas de PET primario.

(Capítulo 8, sección 8.1.3)

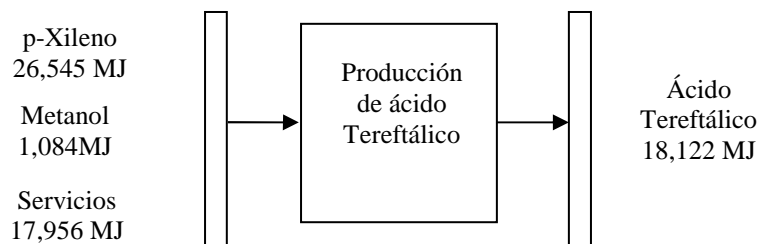
A continuación se presentan los cálculos de irreversibilidades por bloque en cada proceso, aplicando la ecuación 7.8:



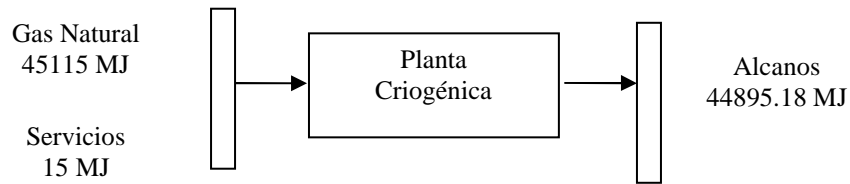
$$Irr = (674,716MJ + 148 MJ) - (614,266.91 MJ) = 60,597.09 MJ$$



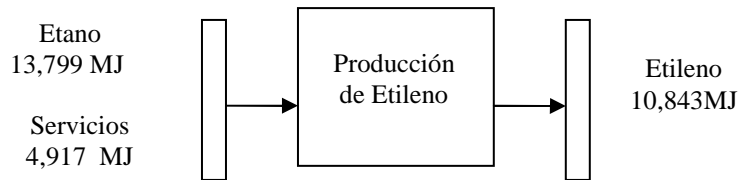
$$Irr = (34,383 MJ + 5,858 MJ) - (26,545 MJ) = 13,696 MJ$$



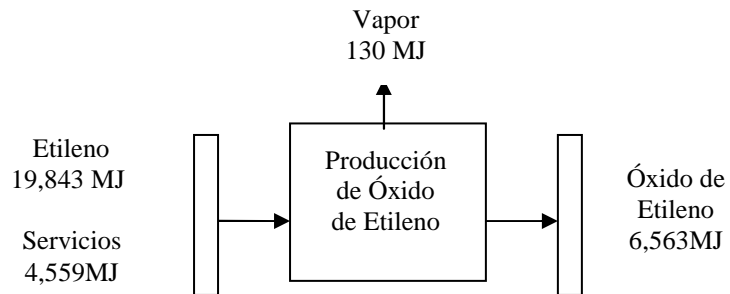
$$Irr = (26,545 MJ + 1,084MJ + 17,956 MJ) - (18,122 MJ) = 27,463MJ$$



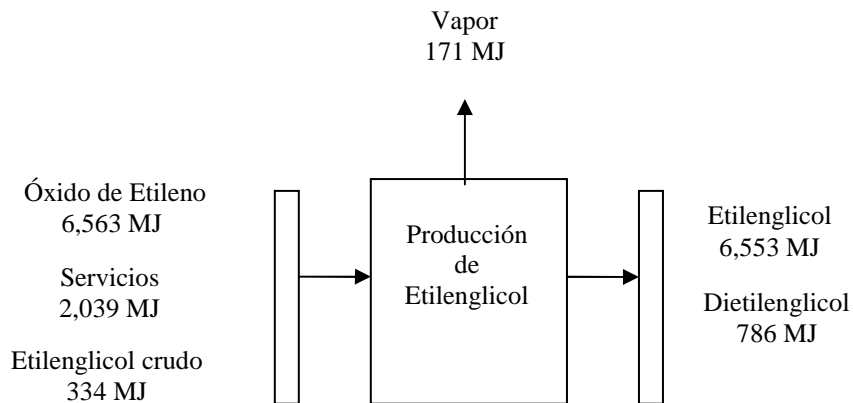
$$Irr = (45,115MJ + 15 MJ) - (44,895.18MJ) = 234.82 MJ$$



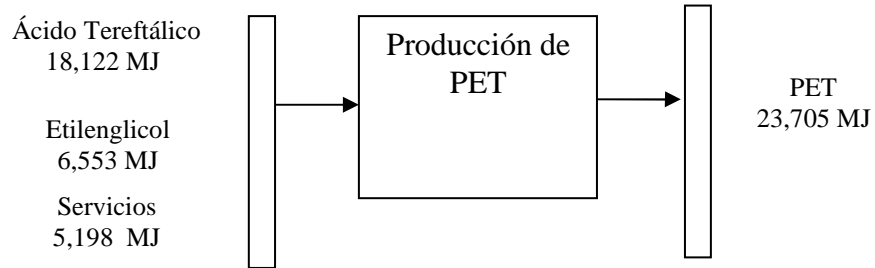
$$Irr = (13,799MJ + 4,917MJ) - (10,843 MJ) = 7,873MJ$$



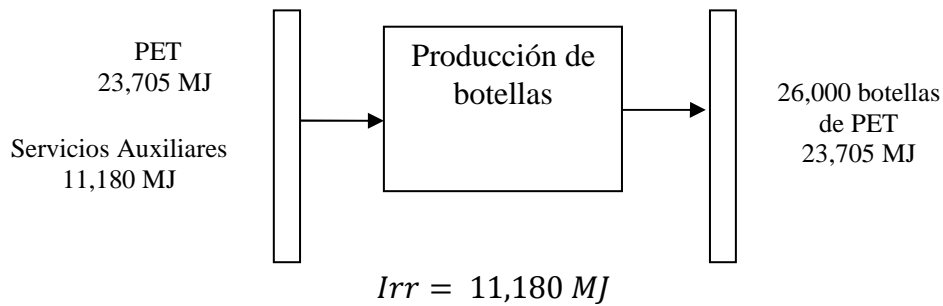
$$Irr = (19,843 MJ + 4,559MJ) - (6,563 MJ + 130) = 17,709 MJ$$



$$Irr = (6,563 MJ + 2,039MJ + 334) - (6,553MJ + 786 + 171MJ) = 1,426MJ$$



$$Irr = (18,122 \text{ MJ} + 6,553 \text{ MJ} + 5,198 \text{ MJ}) - (23,705 \text{ MJ}) = 6,168 \text{ MJ}$$



Vidrio (Capítulo 8, sección 8.2)

Exergías químicas de componentes del vidrio.

Para el cálculo de las exergías químicas de los constituyentes del vidrio se consideraron los siguientes valores de exergía de los elementos involucrados:

Tabla 11 Exergías químicas de los elementos constitutivos del vidrio.		
Elemento	Exergía química (KJ/Kmol)	Exergía química (KJ/Kg)
Si	854,900	30,532.1429
Na	336,600	14,634.7826
Ca	729,100	18,227.5
O	3,970	124.0625
C	410,260	34,188.333

Fuente: Szargut, 1988.

SiO_2 (Peso Molecular: 60 Kg/Kgmol):

$$\text{Fracción mol Si} = 0.467$$

$$\text{Fracción mol Oxígeno} = 0.533$$

$$e_{ch}^o = \left(-14,281.703 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.467 * 30,532 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.533 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{ch}^o = 42.833 \frac{KJ}{Kg_{SiO_2}}$$

Na_2CO_3 (Peso Molecular: 106 Kg/Kmol):

$$\text{Fracción mol Sodio} = 0.434$$

$$\text{Fracción mol Carbono} = 0.113$$

$$\text{Fracción mol Oxígeno} = 0.453$$

$$e_{ch}^o = \left(-9846.336 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.434 * 14,635 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.113 * 34,188 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.453 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{ch}^o = 424.67 \frac{KJ}{Kg_{Na_2CO_3}}$$

$CaCO_3$ (Peso Molecular: 100 Kg/Kmol):

$$\text{Fracción mol Calcio} = 0.4$$

$$\text{Fracción mol Carbono} = 0.12$$

$$\text{Fracción mol Oxígeno} = 0.48$$

$$e_{ch}^o = \left(-11,291 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left[\left(0.4 * 18,228 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.12 * 34,188 \frac{KJ}{Kg}\right) + \left(0.48 * 124 \frac{KJ}{Kg}\right)\right]$$

$$e_{ch}^o = 162.15 \frac{KJ}{Kg_{CaCO_3}}$$

Feldespato (Silicato de aluminio, $Al_6(Si_2O_5)_3$ = 270 MJ/ton [46].

Exergía química de emisiones atmosféricas en la producción de vidrio primario.

(Capítulo 8, sección 8.2)

Bióxido de Carbono (CO₂):

Emisión: 12.396 ton. CO₂/u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CO_2}^o = \left(12,396 \frac{Kg_{CO_2}}{u.f.} \right) * \left(0.45 \frac{MJ}{Kg_{CO_2}} \right) = 5578.2 \frac{MJ}{u.f.}$$

Monóxido de Carbono (CO):

Emisión de CO: 0.009493 ton. CO /u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CO}^o = \left(9.493 \frac{Kg_{CO}}{u.f.} \right) * \left(9.823 \frac{MJ}{Kg_{CO}} \right) = 93.25 \frac{MJ}{u.f.}$$

Dióxido de Azufre (SO₂):

Emisión de SO₂: 0.072816 ton. SO₂/u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{SO_2}^o = \left(72.816 \frac{Kg_{SO_2}}{u.f.} \right) * \left(4.898 \frac{MJ}{Kg_{SO_2}} \right) = 356.653 \frac{MJ}{u.f.}$$

Metano (CH₄):

Emisión de CH₄: 0.02113 ton. CH₄/ u.f. (SIMA PRO)

Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{CH_4}^o = \left(21.13 \frac{Kg_{CH_4}}{u.f.} \right) * \left(51.978 \frac{MJ}{Kg_{CH_4}} \right) = 1098.295 \frac{MJ}{u.f.}$$

Dióxido de Nitrógeno (NO₂):

Emisión de NO₂: 0.047852 ton. NO₂/ u.f. (SIMA PRO)

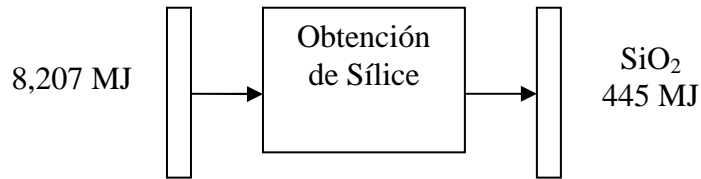
Exergía química emitida: (masa emitida)*(exergía química del compuesto)

$$e_{NO_2}^o = \left(47.852 \frac{Kg_{NO_2}}{u.f.} \right) * \left(1.209 \frac{MJ}{Kg_{NO_2}} \right) = 57.853 \frac{MJ}{u.f.}$$

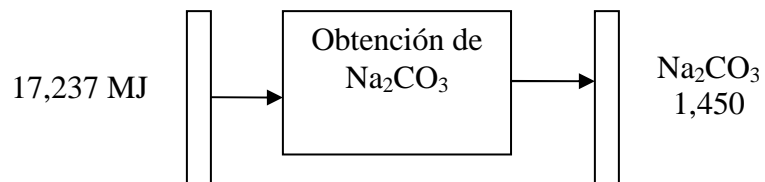
Cálculo de irreversibilidades en la producción de vidrio primario.

(Capítulo 8, sección 8.2)

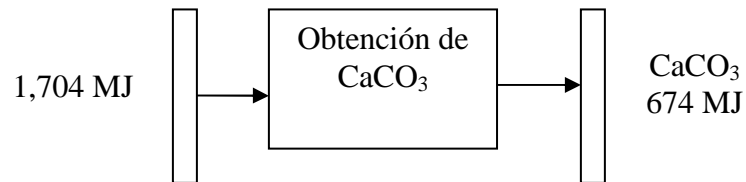
A continuación se describe el cálculo de irreversibilidades en la producción de botellas de vidrio primario en cada una de sus etapas aplicando la ecuación 7.8.



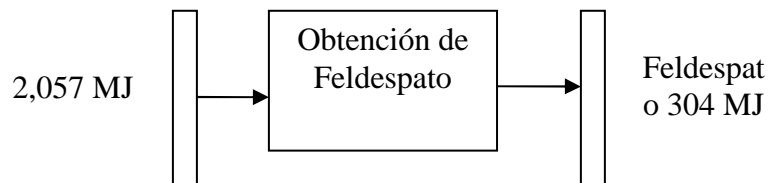
$$Irr = (8,207 \text{ MJ}) - (445 \text{ MJ}) = 7,762 \text{ MJ}$$



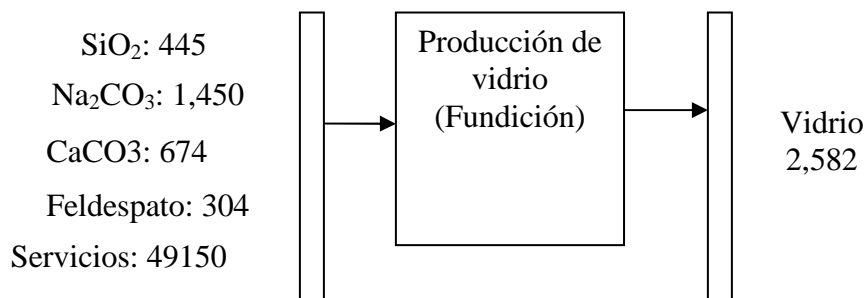
$$Irr = (17,237 \text{ MJ}) - (1,450 \text{ MJ}) = 15,787 \text{ MJ}$$



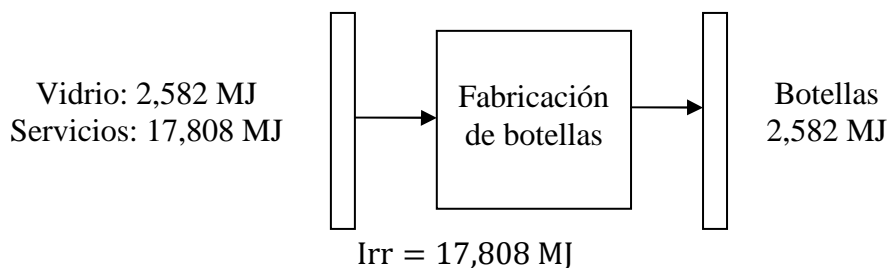
$$Irr = (1,704 \text{ MJ}) - (674 \text{ MJ}) = 1,030 \text{ MJ}$$



$$Irr = (2,057 \text{ MJ}) - (304 \text{ MJ}) = 1,753 \text{ MJ}$$



$$Irr = (445MJ + 1,450MJ + 674MJ + 304MJ + 49150MJ) - (2,582MJ) = 49,441 MJ$$



Latas de aluminio

(Capítulo 8, sección 8.3)

Exergías químicas de componentes del aluminio.

Tabla 12 Exergías químicas de los elementos involucrados en la producción de aluminio.	
Elemento	Exergía química (KJ/Kmol)
Al	795,700
Ca	729,100
Na	336,600
C	410,260
O	3,970

Fuente: Montero G., 2006.

En base a la reacción de formación de aluminio dentro de las celdas electrolíticas se tiene que la alúmina necesaria es:

$$\frac{2}{3}Al_2O_3 + C \rightarrow \frac{4}{3}Al + CO_2$$

$$\left[2319 \frac{Kg Al}{u.f.}\right] * \left[68 \frac{Kg Al_2O_3}{Kmol}\right] * \left[\frac{Kmol}{36 Kg Al}\right] = 4,380 \frac{Kg Al_2O_3}{u.f.}$$

Conociendo la exergía química de la alúmina [46], tenemos:

$$e_{Al_2O_3} = \left[4.380 \frac{ton}{u.f.} \right] * \left[205 \frac{MJ}{ton} \right] = 897.9 \frac{MJ}{u.f.}$$

Óxido de Calcio (Peso Molecular: 56 Kg/Kmol) :

$$Fracción\ mol\ Calcio = 0.714$$

$$Fracción\ mol\ Oxígeno = 0.286$$

$$e_{ch}^o = \left(-10,768.042 \frac{KJ}{Kg} \right) + \left[\left(0.714 * 18,227.5 \frac{KJ}{Kg} \right) + \left(0.286 * 124 \frac{KJ}{Kg} \right) \right]$$

$$e_{ch}^o = 2,281.857 \frac{KJ}{Kg_{CaO}}$$

Na_2CO_3 : 424.67 (ver cálculo de materias primas del vidrio)

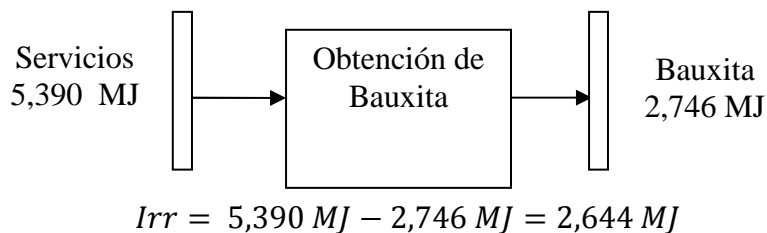
Exergía de Coque: 31,058 MJ/ton [46].

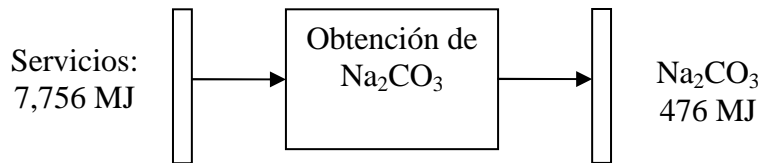
Exergía NaOH: 1,873 MJ/ton [46].

Cálculo de Irreversibilidades en la producción de latas de aluminio primario.

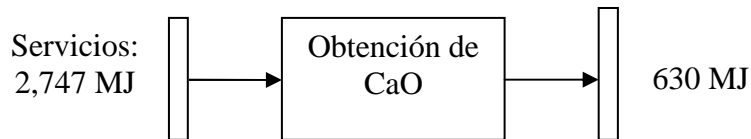
(Capítulo 8, sección 8.3)

Al igual que en el caso de PET y vidrio, la ecuación 7.8 fue aplicada para el cálculo de las irreversibilidades correspondientes a la producción de latas de aluminio primario.

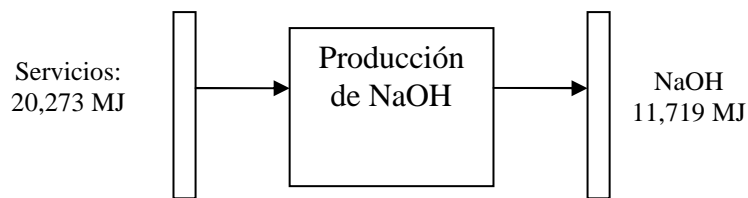




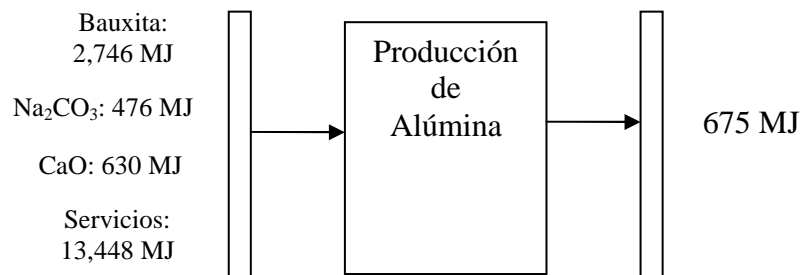
$$Irr = 7,756 \text{ MJ} - 476 \text{ MJ} = 7,280 \text{ MJ}$$



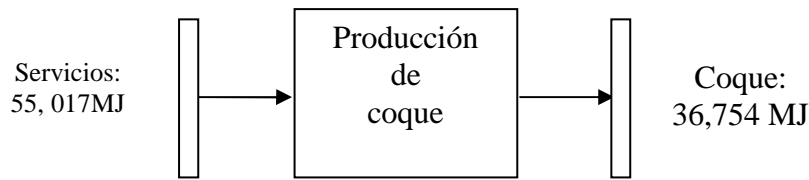
$$Irr = 2,747 \text{ MJ} - 630 \text{ MJ} = 2,117 \text{ MJ}$$



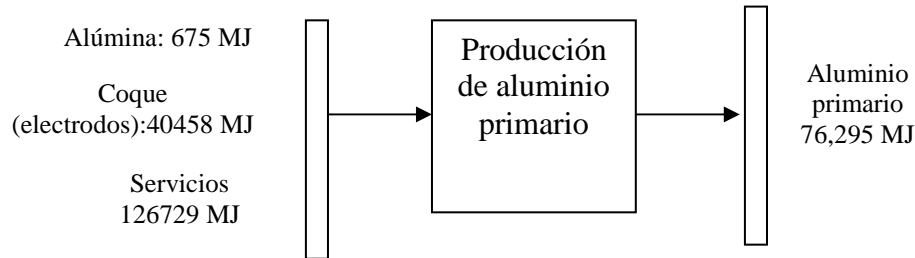
$$Irr = 20,273 \text{ MJ} - 11,719 \text{ MJ} = 8,554 \text{ MJ}$$



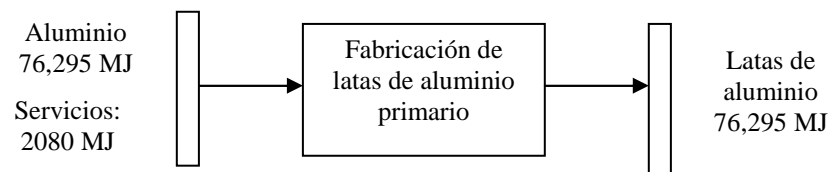
$$Irr = (2,746 \text{ MJ} + 476 \text{ MJ} + 630 \text{ MJ} + 13,448 \text{ MJ}) - 675 \text{ MJ} = 16,625 \text{ MJ}$$



$$Irr = (55,017 \text{ MJ}) - 36,754 \text{ MJ} = 18,263 \text{ MJ}$$



$$Irr = (675 \text{ MJ} + 40458 \text{ MJ} + 126,729 \text{ MJ}) - 76,295 \text{ MJ} = 91,567 \text{ MJ}$$

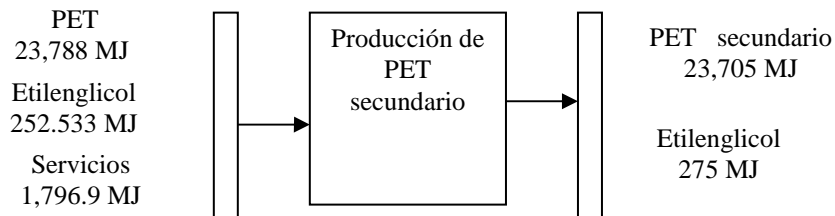


$$Irr = (76,295 \text{ MJ} + 2,080 \text{ MJ}) - (76,295 \text{ MJ}) = 2,080 \text{ MJ}$$

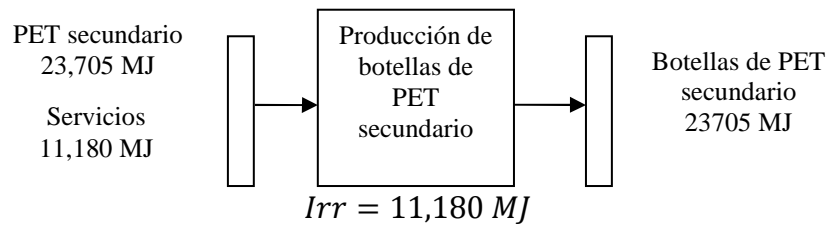
Reciclaje

Cálculo de irreversibilidades en la producción de botellas de PET secundario.

(Capítulo 8, sección 8.4)

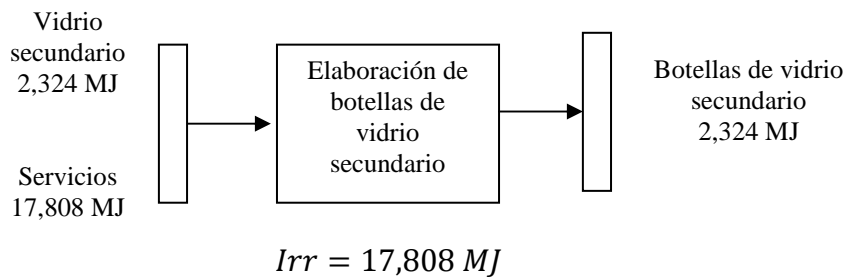
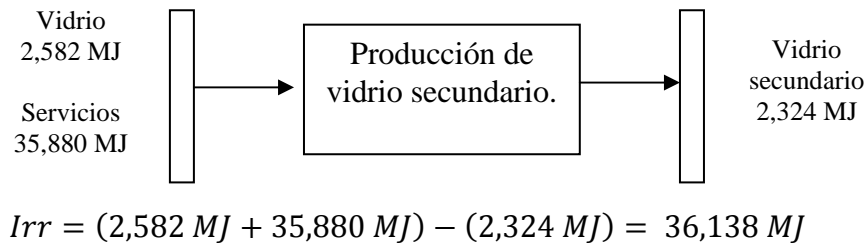


$$Irr = 25,837.433 \text{ MJ} - 23,980 \text{ MJ} = 1,857.433 \text{ MJ}$$



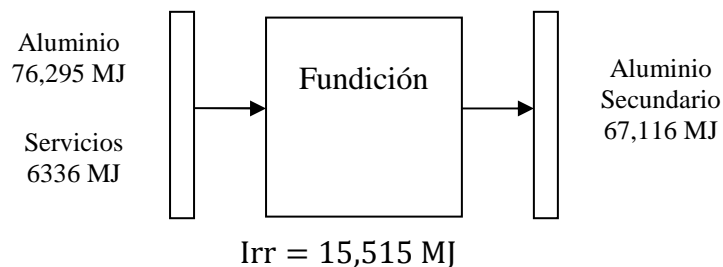
Cálculo de irreversibilidades en la producción de botellas de vidrio secundario.

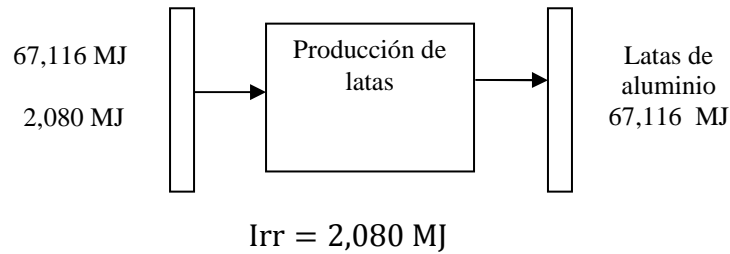
(Capítulo 8, sección 8.5)



Cálculo de irreversibilidades en la producción de latas de aluminio secundario.

(Capítulo 8, sección 8.6)





Inversiones y ganancias en la producción de materiales de envasado primarios

Aplicando la ecuación 7.10 y 7.11 se tienen los siguientes resultados de inversiones y ganancias económicos.

(Capítulo 8, sección 8.9)

Botellas de PET.

$$I = \frac{(19,320 - 7,800) \$/ton}{0.25} = 46,080 \$/ton$$

La depreciación lineal tomando una vida de 10 años es, por lo tanto, 4,608\$/ton. Por lo tanto, la ganancia incluyendo la depreciación, es de \$6,912/ton.

$$Ganancia\ con\ depreciación = (19,320 - 7,800 - 4,608) \$/ton = 6,912 \$/ton$$

Botellas de vidrio.

$$I = \frac{(2,629 - 1,878) \$/ton}{0.25} = 3,004 \$/ton$$

$$Ganancia\ con\ depreciación = (2,629 - 1,878 - 300) \$/ton = 451 \$/ton$$

Latas de aluminio.

$$I = \frac{(25,200 - 18,000) \$/\text{ton}}{0.25} = 28,800 \$/\text{ton}$$

$$\text{Ganancia con depreciación} = (25,200 - 18,000 - 2,880) \$/\text{ton} = 4,320 \$/\text{ton}$$

Inversiones y ganancias en la producción de materiales de envasado secundarios

Botellas de PET.

$$I = \frac{(11,101 - 4,860) \$/\text{ton}}{0.25} = 24,964 \$/\text{ton}$$

La depreciación lineal tomando una vida de 10 años es, por lo tanto, 2,496 \$/ton. Por lo tanto, la ganancia incluyendo la depreciación, es de 3,745 \$/ton.

$$\text{Ganancia con depreciación} = (11,101 - 4,860 - 2,496) \$/\text{ton} = 3,745 \$/\text{ton}$$

Botellas de vidrio.

$$I = \frac{(1,929 - 1,543) \$/\text{ton}}{0.25} = 1,544 \$/\text{ton}$$

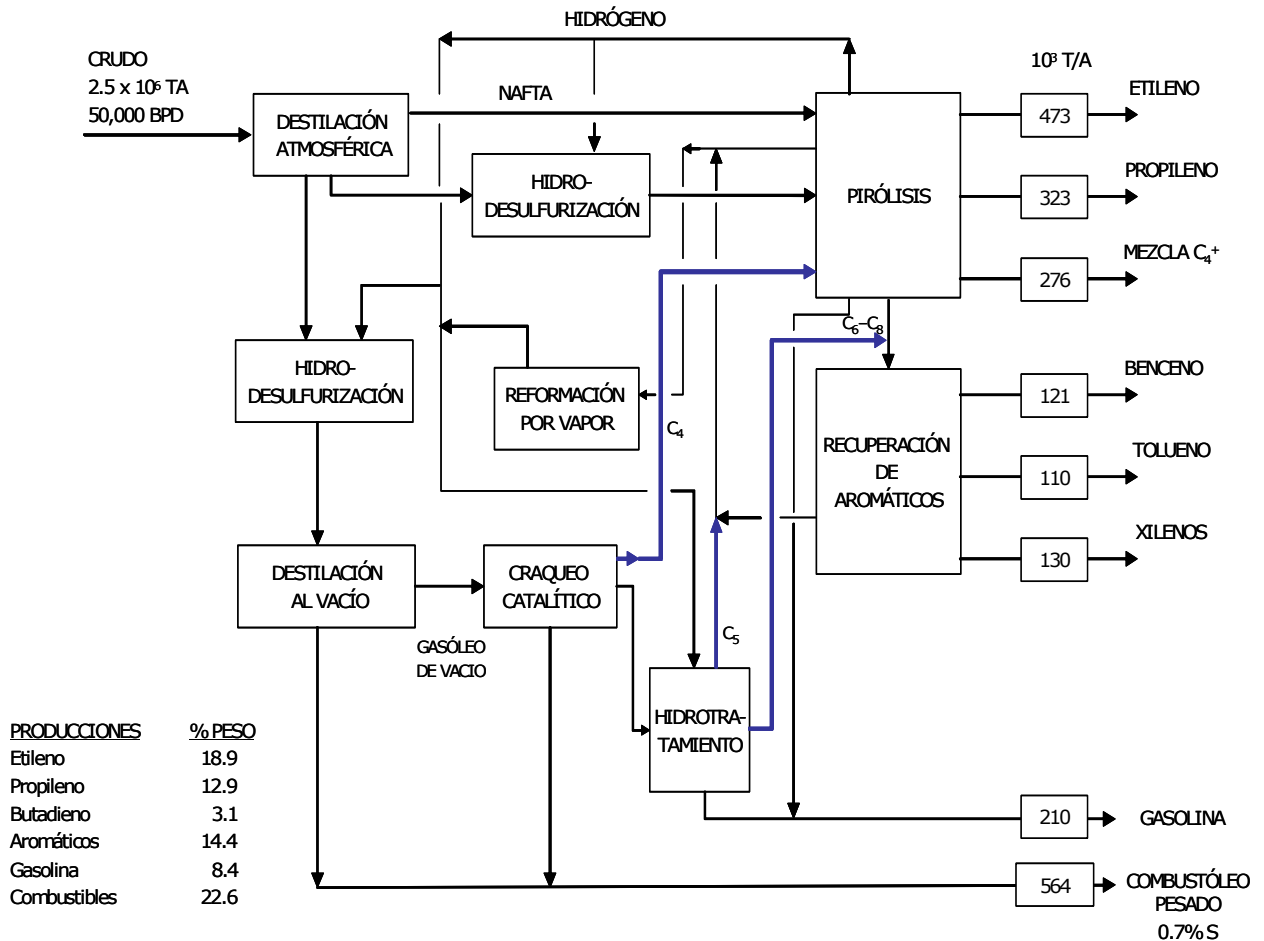
$$\text{Ganancia con depreciación} = (1,929 - 1,543 - 154) \$/\text{ton} = 232 \$/\text{ton}$$

Latas de aluminio.

$$I = \frac{(15,075 - 12,060) \$/\text{ton}}{0.25} = 12,060 \$/\text{ton}$$

$$\text{Ganancia con depreciación} = (15,075 - 12,060 - 1,206) \$/\text{ton} = 1,809 \$/\text{ton}$$

APÉNDICE B
REFINERÍA CONFIGURACIÓN 4.

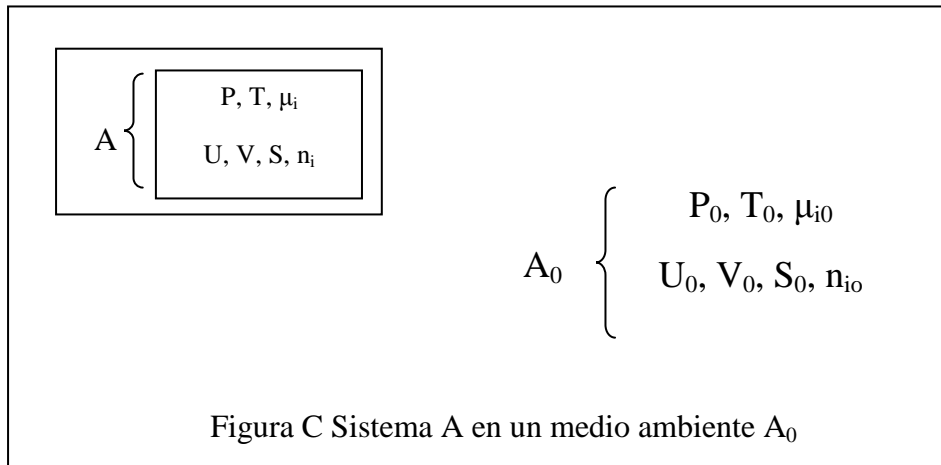


“Destilación atmosférica, de vacío, craqueo catalítico y pirólisis para combustibles y Petroquímicos”.

Fuente: Escobar 2006.

APÉNDICE C
DEDUCCIÓN TERMODINÁMICA DE LA EXERGÍA

El concepto de exergía se deriva de las relaciones termodinámicas de cambios de estado relacionados al concepto de trabajo. Suponga el sistema ilustrado en la siguiente figura, donde el sistema del medio ambiente, A_0 , es homogéneo y de gran tamaño definido por las propiedades intensivas P_0 , T_0 y μ_{i0} (presión, temperatura, potencial químico) y las propiedades extensivas U_0 , V_0 , S_0 n_{i0} (energía interna, volumen, entropía y número de moles). Por otra parte, el sistema A se encuentra dentro de A_0 y está definido con las mismas propiedades extensivas e intensivas.



Ya que A es pequeño, las propiedades intensivas de A_0 no cambian, es decir:

$$dT_0 = 0 \dots \dots \dots \text{ecuación c. 1}$$

$$dP_0 = 0 \dots \dots \dots \text{ecuación c. 2}$$

$$d\tilde{\mu}_{i0} = 0 \dots \dots \dots \text{ecuación c. 3}$$

El cambio de entropía del sistema A_0 es:

$$dS_0 = \frac{1}{T_0} \left(dU_0 + P_0 dV_0 - \sum_i \tilde{\mu}_{i0} dn_{i0} \right) - \frac{dW}{T_0} \dots \dots \dots \text{ecuación c. 4}$$

La entropía diferencial del sistema y el medio ambiente está dado por:

$$dS^{tot} = dS + dS_0 = -\frac{1}{T_0} \left(dU + P_0 dV - T_0 dS - \sum_i \mu_{i0} dn_i \right) - \frac{dW}{T_0} \dots \dots \dots \text{ecuación c. 5}$$

Donde:

$$de = dU + P_0 dV - T_0 dS - \sum_i \mu_{i0} dn_i \dots \dots \dots \text{ecuación c. 6}$$

De esta manera la ecuación c.5 se puede reescribir como:

$$dS^{tot} = -\frac{1}{T_0} (de - dW) \dots \dots \dots \text{ecuación c. 7}$$

Considerando a partir de la definición de exergía que el valor de ésta es cero en el equilibrio, entonces la energía interna del sistema queda expresada como:

$$U = TS - PV - \sum_i \mu_i n_i \dots \dots \dots \text{ecuación c. 8}$$

Así, relacionando la integración de la ecuación c.6 con c.8 se tiene:

$$e = S(T - T_0) - V(P - P_0) + \sum_i n_i (\mu_i - \mu_{i0}) \dots \dots \dots \text{ecuación c. 9}$$

Por otra parte, integrando la ecuación c.7 con el cambio de la exergía hacia el equilibrio (-e) se obtiene:

$$\Delta S^{tot} = -\frac{1}{T_0} (W - e) \dots \dots \dots \text{ecuación c. 10}$$

$$W = e - T_0 \Delta S^{tot} \dots \dots \dots \text{ecuación c. 11}$$

De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica donde la diferencia de entropía en un sistema es mayor a cero para un proceso real, $\Delta S_{tot} > 0$ y $\Delta S_{tot} = 0$ para un proceso reversible entonces:

$$W \leq e \dots \dots \dots \text{ecuación c. 12}$$

Así, la exergía es la cantidad máxima de trabajo que puede ser extraído del sistema A para alcanzar el equilibrio con su medio ambiente A₀.

De la integración de la ecuación c.6 y en un estado de equilibrio se tiene:

$$e = U - U_{eq} + P_0(V - V_{eq}) - T_0(S - S_{eq}) - \sum_i \mu_{i0}(n_i - n_{ieq}) \dots \dots \text{ecuación c. 13}$$

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica en equilibrio con el medio ambiente de referencia se tiene que:

$$H - H_{eq} = U - U_{eq} + P_0(V - V_{eq}) \dots \dots \dots \text{ec. c. 14}$$

Denotando la referencia con el medio ambiente como “0”, y sin existir cambio de concentración del sistema, se simplifica la ecuación c.13 para definir a la exergía como:

$$e = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \dots \dots \text{ecuación c. 15}$$

Ésta es la ecuación general para la evaluación práctica de la exergía.

Fuente: Wall G., 2009, “Exergetics”, <http://exergy.se/>

FUENTES CONSULTADAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas, Centro de Información, 1992, “Programa 21”: <http://www.cinu.org.mx/onu/onu.htm>
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1988, “Cuestiones de Sostenibilidad” www.fao.org
- [3] Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, LGEEPA, 2001
- [4] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2008, “El PNUD y el cambio climático”, New York. <http://www.undp.org/spanish/about/basics.shtml>
- [5] Instituto Nacional de Ecología, (INE), 2005, “El mercado de bonos de carbono” http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html
- [6] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comité Mexicano para Proyectos de Mitigación y Captura de Gases de Efecto Invernadero, 2003, “Origen de los Mercados de Carbono”.
- [7] Glynn J., G. Heinke, 1999, Ingeniería Ambiental. Person Prentice Hall, 2ª edición. págs.50-52, 590-595.
- [8] British Petroleum, 2010 June, Statistical Review of World Energy, <http://www.bp.com>
- [9] Moriarty and Honnery, April 2009, What Energy levels can the Earth Sustain?.,, Department of Industrial Design, Australia, Energy Policy, Elsevier, 2469-2474.
- [10] Pimentel D., M. Herz, M. Glickstein, M. Zimmerman, R. Allen, K. Becker, 2002, Renewable energy: current and potential issues, BioScience 52, 1111-1120.
- [11] International Energy Agency (IEA), 2009, World Energy Outlook.
- [12] Secretaría de Energía (SENER), 2010, Estrategia Nacional de Energía, págs.14, 15, 20, 70, www.sener.gob.mx.
- [13] Kirk R., D. Othmer, 1984, Enciclopedia de Tecnología Química, Estados Unidos, Editorial Hispano-Americana, pág. 27, 30, 37.
- [14] Secretaría de Energía (SENER), 2007, Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica.
- [15] Vian A., 1996, Introducción a la Química Industrial, Editorial Reverté, España, segunda edición, pág. 40.
- [16] Escobar Toledo Carlos E., 2006, “Restitución del Valor Agregado y de la Productividad de algunas cadenas improductivas de la industria Petroquímica en México a través de la Reestructuración, Simulación y Jerarquización Tecnológica y de Inversiones”. PAPIIT IN106203-2, DGAPA.
- [17] Dunham K., 1974, Non-renewable mineral resources. Resources Policy. Págs. 3-12.

- [18] Meadows DH., Randers J., 1972, Limits of growth, New York: Universe Books.
- [19] Secretaría de Energía (SENER), 2008, Balance Nacional de Energía, pág. 23.
- [20] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), www.pnuma.org
- [21] SEMARNAT, 2010, México ante el Cambio Climático, Conferencias de Energía y Cambio Climático, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [22] Diario Oficial de la Federación (DOF), Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003, <http://dof.gob.mx>
- [23] Colomer F.J., A. Gallardo, 2007, Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Págs. 51, 91-94, 165, 224, 234.
- [24] Tchobanoglous G, H. Theissen, R. Eliassen, 1992, Desechos Sólidos. Principios de Ingeniería y Administración. Pág. 9,10.
- [25] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2006, Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México 2005, Capítulo 7, pág. 327,333.
- [26] Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2008, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas.
- [27] Gómez M.G., 2009, Aplicación de Técnicas de Ciclo de Vida al Diseño de un Sistema de Gestión de Residuos Urbanos para la Ciudad de Chihuahua. Universitat Rovira Virgili, Tarragona, pág. 85.
- [28] Tchobanoglous G. 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Volumen II. McGraw-Hill. Madrid, págs. 719,720, 935-949.
- [29] Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA), 2007, Incineration of Municipal Solid Waste, Pág.9.
- [30] Instituto Nacional de Ecología (INE), 2007, “Evaluación de la Incineración de Residuos Peligrosos”, gaceta 381, www.ine.gob.mx
- [31] SEMARNAT, 2001, Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos, págs. 125, 126,130, 189, 190.
- [32] Environmental Protection Agency (EPA), <http://www.epa.gov/espanol/>
- [33] Dincer I., M. Rosen, 2007, Exergy. Energy, Environment and Sustainable Development. Exergy, Environment and Sustainable Development. Elsevier, pág. 2-6, 13-15, 30, 36-37.
- [34] Kotas T.J., 1995, The exergy method of thermal plant analysis. Department of Mechanical Engineering, University of London. Krieger Publishing Company, págs. 29-50.

- [35] Balzhiser R.E., Samuels M.R., Eliassen J.D., 1974, Termodinámica Química para Ingenieros, España, Prentice Hall, págs.31-51.
- [36] Levenspiel O., 1996, Understanding Engineering Thermo, Prentice Hall Inc., 1ª edición, págs. 54-58.
- [37] Smith, 1997, Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Mc. Graw Hill, 5ª edición, México, págs. 22-24.
- [38] Sophos., 1981, “Multiobjective analysis and planning of the petrochemical industry and the synthesis of distillation sequences with energy integration schemes”, tesis doctoral, Universidad de Minesota, págs. 9-11.
- [39] Niembro García Isabel Joaquina. Energía y Exergia: Enfoques hacia la Sostenibilidad mediante el Análisis de Ciclo de Vida. 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [40] Wark K., D. Richards, 2001, Termodinámica, McGraw Hill, 6ª edición, España. págs.456, 457.
- [41] Foladori G., 2001. Controversias sobre Sustentabilidad: la co-evolución sociedad-naturaleza. Primera edición. Universidad Autónoma de Zacatecas. Editorial Miguel Ángel Porrúa. México, D.F, págs.121, 128. 130.
- [42] Russell L., G.Adebiyi,1997. Termodinámica Clásica. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, Delaware, Estados Unidos, págs. 354, 355, 359.
- [43] Rivero R., M. Garfias, 2006, Standard chemical exergy of elements updated, Instituto Mexicano del Petróleo, Energy Elsevier, pág. 3310-3326.
- [44] Hernández Santoyo J., 2006, Tesis de maestría: “Sustentabilidad del Sector Petrolero en México aplicando el Método de Análisis de Exergia” Director de tesis: Dr. Rivero Rodríguez R., Ciudad Universitaria, págs.10-20, 106-110.
- [45] Yunus A., M. Boles, 2002, Thermodynamics, an Engineering approach, Fourth Edition, New York, pág. 391-430.
- [46] Szargut J., 2005, Exergy Method. Technical and Ecological Applications, Sweden, Wit Press, pág. 21-37, 62, 69, 129.
- [47] Szargut J., D. Morris, Steward F., 1998, Exergy analysis of thermal and metallurgical processes, Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, pág. 332.
- [48] Rivero R. Curso, 2010, “Uso Eficiente de Energía (exergia)”.
- [49] Meester B., J. Dewulf, 2006, An Improved Calculation of the Exergy of Natural Resources for Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA), Environment Science and Technology, pág. 6844-6851.

- [50] Cornelissen R.L., 1997, Thermodynamics and sustainable development. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, Enschede, The Netherlands. Págs. 32-40.
- [51] Rosen M., 2002, Exergy and economics: Is exergy profitable?, Exergy, an International Journal, Elsevier, University of Ontario.
- [52] Rosen M., 2002, Can exergy help us understand and address environmental concerns?, Exergy, an International Journal, Elsevier, University of Ontario. Págs. 214-217.
- [53] Bejan A., Mamut E., 1999, Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems, Netherlands, pág. 221-225.
- [54] Suppen N., Van Hoof B., 2005, Conceptos Básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su Aplicación en el Eco-diseño, Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Desarrollo Sustentable (CADIS), Pág. 8.
- [55] United Nations Environment Programme (UNEP), 2004, ¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?, Publicación de las Naciones Unidas.
- [56] ISO 14040, Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, NMX-SAA-14040-IMNC-2008, NMX-SAA-14044-IMNC-2008.
- [57] Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Desarrollo Sustentable (CADIS), 2009, “Introducción al Análisis de Ciclo de Vida”, Estado de México.
- [58] Methods Library, 2008, PRÉ Consultants, Netherlands.
- [59] Frischknecht R., N. Jungbluth, 2007, “Code of Practice”, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- [60] Frischknecht R., N. Jungbluth, 2007, “Overview and Methodology”, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- [61] Envases y Medio ambiente. Walter Pardavé Livia. 2000. ECOE Ediciones 2ª edición.
- [62] Memoria Estadística 2008-2009, Cámara Nacional de Fabricantes de Envases Metálicos (CANAFEM).
- [63] Hans-Georg E., 1984, Macromolecules II, Midland, Michigan. Plenum Press. Second edition, pág. 855-871.
- [64] Society of the Plastics Industry, 1998, <http://www.plasticsindustry.org/>
- [65] Yarto Ramírez M., 2001, Secretaría de Medio Ambiente el Distrito Federal, “Situación de los envases plásticos en México”, pág. 25-27.
- [66] Vlack V., 1990, Materiales para la Ingeniería, C.E.C.S.A, Editorial Continental. 10ª edición, págs. 221-230.

- [67] Smith W., J. Hashemi, 2007, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. España, McGraw-Hill Iberoamericana. pág. 468, 629, 630.
- [68] Stevens M., 1999, Polymer Chemistry. An Introduction, Third Edition, Oxford University Press, United States of America, pág. 338-358.
- [69] Berho M., M. Pisoni, Recomendaciones para reciclar: una introducción al reciclado a gran escala de PET. pág. 5-14.
- [70] SRI Consulting, 2008, http://www.sriconsulting.com/Areas_of_Interest/Plastics/
- [71] ESSA Reciclados de México, S.A. de C.V. (RECIMEX), 2009, Av. Cien metros 220, D.F., <http://www.recimex.com.mx/>
- [72] Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), 2008, "The compelling facts about plastics: an analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008", pág.14-24.
- [73] Lorenzetti C., P. Manaresi, 2006, Chemical Recovery of Useful Chemicals from Polyester (PET) Waste for Resource Conservation: A Survey of State of the Art. Journal of Polymers and the Environment, Volumen 14.
- [74] Escobar Toledo C., F. López Serrano, 2010, Plastics Recycling (Post consumption), Economic and Sustainable Development, Propuesta de Convenio México-Francia.
- [75] Vijaykumar S., R. Mayank, 2008, PET Waste Management by Chemical Recycling: A Review. Journal of Polymers and the Environment, Volumen 18.
- [76] Del Val Alfonso, 1993, Reciclaje. Manual para la recuperación y aprovechamiento de las basuras. 2ª Edición. Madrid. Editorial Integral.
- [77] Gerhartz W., Y. Stephen, 1985, Ullmann's, Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5ª edición, Alemania, Volúmenes A1 (pág. 459-479), A12 (pág. 408-429).
- [78] Grupo Modelo, 2009, Museo Modelo de Ciencia y Tecnología (MUMCI), Estado de México, http://www.gmodelo.com.mx/intro_es_4.html
- [79] Careaga J.A., 1993. Manejo y Reciclaje de los Residuos de Envases y Embalajes, Monografía de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), pág. 28, 30.
- [80] Totten G., D. Scott. 2003. Handbook of Aluminum. Volumen 1. Physical Metallurgy and Processes. Seattle, Washington, U.S.A. Marcel Dekker. Volumen I, Págs. 1-30.
- [81] Barrand P., R. Gadeau, 1967, Enciclopedia del Aluminio, España, pág. 221.
- [82] American Society for Metals, 1978, Aluminum Transformation Technology and Applications, Argentina, pág. 463.
- [83] World Packaging Organisation (WPO), 2009, "Market Statistics and future trends in global packaging", www.worldpackaging.org

- [84] Centro Empresarial del Plástico, Adolfo Prieto No.424, Col. Del Valle, jarmillas@plastico.com.mx, Tel. (55) 669-3325.
- [85] Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, 2008, Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, pág. 45.
- [86] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, 2007, “Oportunidades en la relación económica y comercial entre China y México”.
- [87] Newspaper, Access my library, “Niegan productores de vidrio ser desplazados por el PET”. http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-5109790_ITM
- [88] Newspaper, Access my library, “Crece industria del vidrio en México, decae en el mundo”. http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-1751194_ITM
- [89] Revista Ambientum, 2003, “Aumenta en un 11% la cantidad de vidrio reciclado gracias a la sensibilización de los ciudadanos”, http://www.ambientum.com/revista/2003_04/vidrio.htm
- [90] European Aluminium Association (EAA). Statistics. <http://www.eaa.net/en/statistics/recycled-aluminium/>
- [91] Anuario Estadístico de PEMEX, 2010, pág. 30-42, www.pemex.com
- [92] Process Economics Program (PEP), International YearBook, 1998, SRI- Consulting, Shao-Hwa Wang Editor, United States.
- [93] PEMEX, 2009, Informe de responsabilidad social, pág. 100-102.
- [94] Boustead I., GF., Hancock, 1997, Handbook of Industrial energy analysis, John Wiley, pág. 106, 335, 343, 359
- [95] Maddox K., 1985, Mineral Industries Bulletin, 18, Colorado School of Mines.
- [96] Chapman PF., F. Roberts, 1983, Metal resources and energy, Butterworth England, pág. 88.
- [97] Valero A., 2009, Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth’s mineral capital. The Case of bauxite-aluminium and limestone-lime chain, Energy Journal Elsevier, pág.
- [98] Grupo Industrial Saavedra S.A. de C.V., 2008, “El incremento en los precios de Na_2CO_3 preocupa a los fabricantes” www.grupoindsaavedra.com/noticias/index.php?article=122
- [99] Revista minera, Noticias Nacionales e Internacionales, 2010, “Pronósticos de precios de metales básicos para 2010”, <http://revistaminera.wordpress.com/2010/04/06/pronosticos-de-precios-de-metales-basicos->
- [100] Centro de acopio de materiales reciclables del Distrito Federal, Delegación Coyoacán, Colonia

- [101] Minera Nacional, Industrias Básicas y Minería, Noticias, 2009, “Costo de producir aluminio supera precios de venta”, http://www.ebmineranacional.net/portal_minera/index.php?option=com_content&view=article&id=88:costo-de-producir-aluminio-supera-precios-de-venta&catid=1:latest-news&Itemid=18
- [102] Spini S., M. Leonardi, 1996, “El reciclado de aluminio y la Ecología”. <http://www.ingenieroambiental.com/?pagina=874>
- [103] Brans J.,M. Bertrand, 2002, “PROMÉTHÉE-GAIA Une méthodologie d’aide à la decision en presence de critères multiples”. Editions de l’Université Libre de Bruxelles.
- [104] Escobar C., López B., 2000, “The use of multicriteria decisión aid system in the information technology allocation problem”.
- [105] Escobar Toledo C., 2009, Notas del curso: “Métodos matemáticos para la toma de decisiones”. UNAM.
- [106] Mata A., C., Gálvez, Reciclaje de Vidrio, Universidad Autónoma de Guadalajara, <http://genesis.uag.mx/posgrado/revistaelect/calidad/cal010.pdf>
- [107] Chanda M., S. Roy, 1998, Plastics Technology Handbook, Marcel Dekker Inc., third edition, pág. 960-968.
- [108] Perry R., 2001, Manual del Ingeniero Químico, cap. 26, pág. 58-73.
- [109] Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA), 2000, “Análisis de los desechos de plástico PET”, Universidad del Salvador, pág. 19. http://www.ccad.ws/proarca/p_proarca/pdf_sigma/Pet.pdf
- [110] Montero G., 2006, Tesis de doctorado: “Determinación del Potencial de Mejoramiento Exergoecológico de Unidades de Refinación de Petróleo con efluentes gaseosos”, Director de tesis: Dr. Rivero Rodríguez R., Ciudad Universitaria, págs. 58.