

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUSTENTABILIDAD DEL SECTOR
PETROLERO EN MÉXICO APLICANDO EL
MÉTODO DE ANÁLISIS DE EXERGIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ENERGÍA)**

P R E S E N T A :

ING. JOEL HERNÁNDEZ SANTOYO



**Director de Tesis
Dr. Ricardo Rivero Rodríguez**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. Jaime Cervantes de Gortari**

Vocal: **Dr. José Miguel González Santaló**

Secretario: **Dr. Ricardo Rivero Rodríguez**

1er Suplente: **Ing. Augusto Sánchez Cifuentes**

2do Suplente: **Dr. Gerardo Serrato Ángeles**

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto Mexicano del Petróleo**

a la memoria de mi amigo Pascal

Esta tesis está dedicada especialmente a mis Padres: Rosario y Joel.

A ti Mamá, por ser una mujer maravillosa y tener una luz muy especial.

A ti Papá, por tu amor en silencio y al gran esfuerzo que has hecho en la vida.

Para mis hermanos Reina, Oscar y Gloria.

A ti Reina como una muestra que con persistencia podemos lograr lo que anhelamos; a ti Oscar como un presente para explorar y percibir que las letras son deleite de sabiduría, a ti Gloria como un retrato para que sigas luchando con vehemencia.

Con mucho cariño para Claudelia.

A ti, por considerarme una parte de tu corazón.

A mis otros amigos, Myrna y Eugenio.

A ustedes por el placer de contar con una amistad sincera.

A mis amigos y compañeros de la Maestría; en especial a Hilda.

A los amigos incondicionales Lorena, Vanesa, Roberto, Armando y Ricardo; por el privilegio de saber que son mis amigos.

A este arte que ha sido parte ya de mi vida: al AIKIDO.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México.

A un amor que llevaré en mi memoria por siempre.

Resumen

El concepto de sustentabilidad tiene sus antecedentes desde hace más de 4,000 años atrás, cuando se daban vestigios del deterioro del entorno natural. Ya en épocas recientes, este concepto ha jugado un papel muy importante por conocer el impacto que el ser humano ha provocado al medio ambiente. Por ello, en la década de los 70's del siglo pasado, surgió el concepto de Desarrollo Sustentable, en donde se daba una primera visión de los problemas del entorno global. Una definición del Desarrollo Sustentable fue publicada por medio de un reporte llamado el "Reporte Brundtland" en la década de los 80's. El reporte se pudo describir como una llamada a la ética de la comunidad internacional y el compromiso de preservar valores globales que pueden ir más allá de las fronteras entre naciones, las razas y la religión.

A partir de los fundamentos teóricos de la sustentabilidad, en este trabajo de tesis se presenta un estudio para determinar el nivel de sustentabilidad de un sector estratégico para México utilizando una herramienta termodinámica llamada el análisis de exergía. Específicamente, se desarrollaron indicadores de sustentabilidad exérgica para Petróleos Mexicanos (Pemex) partiendo del Balance de Exergía de cada una de sus subsidiarias. Los indicadores son una primera propuesta para establecer parámetros sustentables para el sector petrolero, sin embargo, un estudio más detallado a futuro sería conveniente en desarrollar para determinar con mayor rigor el nivel de sustentabilidad de dicho sector.

Es importante la cuantificación de la sustentabilidad, sin embargo las complejas relaciones que existen entre los sistemas (sean energéticos, económicos, ecológicos y sociales) imponen que se utilice no solamente uno sino diversos indicadores y parámetros, simultáneamente, para expresar la estabilidad de los mismos. Para ello, un parámetro que puede cambiar el rumbo de la

cuantificación de la sustentabilidad, en particular para la consideración de los aspectos energéticos y ecológicos, es la generación de entropía o análisis de exergía.

En detalle, el análisis de exergía es una aplicación sistemática de los dos principios de la termodinámica para analizar la optimización energética de los procesos de transformación. Este análisis es una herramienta poderosa para identificar de manera clara y precisa la consideración de la calidad de la energía y determinar los puntos críticos de un sistema donde su mejoramiento puede ser desarrollado. La aplicación del análisis de exergía se ha extendido en un sin número de aplicaciones, en los cuales se consideran los aspectos energéticos, económicos y ecológicos. A partir de allí, la consideración de aplicar un análisis de exergía a un sistema puede ser ampliamente utilizado como una medida de cuantificación de la sustentabilidad, y aunque parezca muy sofisticado, el cálculo de la exergía puede ser una cosa más sencilla de lo que parece y es una indicación técnicamente precisa del grado de reversibilidad, o sea, del efectivo impacto sobre el medio consecuente de la implantación y operación del sistema.

En general, es de esta manera como se presentan los temas de sustentabilidad y exergía en su conjunto en este trabajo de tesis. La tesis está conformada en dos partes y apéndices.

La primera parte está constituida por la teoría del desarrollo sustentable, abarcando desde su reseña histórica hasta los trabajos más sobresalientes de hoy en día. Posteriormente se presenta la definición termodinámica del concepto de exergía y su método de análisis. Seguidamente, se presenta el vínculo que existe entre la exergía y el desarrollo sustentable, denotando la influencia de los Análisis del Ciclo de Vida, los Análisis del Ciclo de Vida Exérgico, el Análisis de Exergía del Ciclo de Vida y el Modelo de las Cuatro E's (4E's). Para su parte final, lo constituye la presentación de diversos indicadores de desarrollo sustentable para el aspecto energético, los cuales han sido desarrollados por diversos organismos internacionales.

La segunda parte contempla una reseña de la situación actual del sector petrolero mexicano, se consideran aspectos operativos de producción de hidrocarburos y petroquímicos del año 2004. Posteriormente, se presentan los resultados del análisis de exergía de cada una de las subsidiarias de Pemex, las cuales son representadas por Diagramas de Grassman de Balance de Exergía; asimismo se muestra el resultado general de Pemex acompañado de su Diagrama General de Balance de Exergía. En seguida, se dan a conocer los indicadores de sustentabilidad exérgica (ISEx) del sector petrolero, los cuales abarcan las dimensiones económicas, ecológica y energéticas. Finalmente, se dan las conclusiones generales.

En lo que respecta a los apéndices, estos conforman una serie de derivaciones termodinámicas del concepto de exergía, una base de datos representativos para el cálculo de exergía de emisiones y la metodología de cálculo de los indicadores de sustentabilidad exérgica.

El uso del análisis de exergía deberá, sin lugar a duda, ser una herramienta indispensable para determinar el grado de sustentabilidad de cualquier sistema, abarcando todos y cada uno de los aspectos energéticos, económicos, ecológicos y sociales.

Abstract

Sustainability concept has its antecedents from 4,000 years ago, when vestiges of nature decrease were presented. For recent times, sustainability concept has played an important role in order to know the environment damage by the human activities. For this reason, early 70's of the past century, Sustainable Development concept emerged, where it gave the first vision of the global earth's problem. Early 80's, a report called "The Brundtland Report" was published to define Sustainable Development. International community have described the report like a call of the ethics and the preservation of global values that these can go further on the boarder nations, the human race and the religion.

In this thesis, a study to determine the sustainability level of an important strategic sector of Mexico, using the thermodynamic tool called exergy analysis is presented by means of the sustainability fundamentals. Specifically, beginning from the Exergy Balance of the Mexican Oil Company (Pemex), Sustainable Exergy Indicators (SExI) of each subsidiary has been developed. These indicators are a first purpose to establish sustainable parameters of petroleum sector, however, a more rigorous detailed study in the future could be implemented to determine the sustainable level of the sector.

It is important to quantify the sustainability level, however, complex relationships among systems (to be energetic, economic, ecologic and social systems), they impose to use not only one but different indicators and parameters, simultaneously, to identify the stability of themselves. For this reason, the exergy analysis could be a new parameter to change the way of the sustainability quantification, with particular attention, energy and ecology aspects.

In detail, exergy analysis is a systematic application of the two laws of thermodynamic to analyze the energy optimization of transformation processes. It is a powerful tool to identify, by clear manner, the consideration of energy quality and determine system's critical points where its improvement can be developed. Exergy analysis application has been extended in a long way of systems, within which energy, economy and ecology aspects are considered. From there, the consideration of exergy analysis application to a system can be widely used as a sustainability quantification, and although it appears a sophisticated methodology, the exergy calculus can be easier than we could suppose and it is a precious technical indication of reversibility grade; in other words, from effectiveness impact of consequent way of the system's implantation and operation.

In general, this work thesis presents the link of both sustainability and exergy concepts. The thesis is constituted by two parts and six series of appendices.

In part one, beginning with Chapter I, it shows the sustainable development theory, from a historical review until nowadays-significant frameworks. Secondly, in Chapter II, thermodynamic definition of exergy concept and its methodology are presented. Thirdly, in Chapter III, the link between exergy and sustainable development has been presented, denoted the influence of Life Cycle Analysis (LCA), the Exergetic Life Cycle Analysis (ELCA), the Life Cycle Exergy Analysis (LCEA) and Four E's Model (4E's). Final part, Chapter IV, it is constituted by the presentation of indicators for sustainable energy development, which they have been developed by widely international organisms.

Second part, beginning with Chapter V, shows the actual review of the Mexican Petroleum Sector; here, it is considered the operative production aspects of hydrocarbons and petrochemicals for year 2004. For Chapter VI, results of the Exergy Analysis of each subsidiaries of Pemex are presented, which they are represented by Grassman Diagrams of Exergy Balance; also here is shown the General Grassman Diagram for Pemex. In Chapter VII, developed of sustainable exergy indicators (SExI) are presented for Pemex, which they contemplate the economy, ecology and energy dimensions. Finally, in Chapter VIII, general conclusions are given.

For appendices, these are constituted by thermodynamic exergy concept derivations, a representative database for the exergy calculus of emissions, and the calculus methodology of the sustainable exergy indicators (SExI).

The use of exergy analysis must, without doubt, to be an indispensable tool to determine the sustainability level of systems, where it could include all and each one of energy, economy, ecology and social aspects.

Résumé

Le concept de durabilité a ses antécédents depuis plus 4,000 ans d'abord, quand le damage de la nature est présenté. Dans l'époque récente déjà, ce concept a un rôle très important pour bien connaître l'impact que l'être humaine a provoqué à l'environnement. Pour cette raison, à début des années 70, le concept du Développement Durable était émergé, et la première impression des problèmes du globe terrestre était présentée. Une définition dans les années 80's du développement durable était publiée pour le rapport qui s'appelle « Le Rapport Brundtland ». Le rapport était décrit comme un appel pour l'éthique de la communiée international et le compromis de la préservation des valeurs globales qui va plus loin de la frontière entre les nations, les espèces humaines et la religion.

À partir des fondements théoriques de la durabilité, dans ce travail de thèse, une étude pour déterminer le niveau de durabilité du secteur pétrolier pour le Mexique par la base de l'utilisation de l'outil thermodynamique qui s'appelle l'analyse de l'exergie est présentée. Spécifiquement, ici, les indicateurs de durabilité exergique (ISEx) pour Petróleos Mexicanos (Pemex) sont présentés, lesquels sont développés à partir du Bilan de l'Exergie par chacune de ses subsidiaires. Les indicateurs sont une première proposition pour établir les paramètres de durabilité pour le secteur pétrolier, en revanche, une étude pourra être réalisé au futur pour développer une méthodologie plus rigoureuse pour qualifier le niveau de durabilité de quel secteur.

La quantification de la durabilité est importante, cependant, les relations complexes entre les systèmes (tells comme systèmes énergétique, économique, écologique et social) qu'imposent l'utilisation non seulement un, sinon différents indicateurs et paramètres simultanément, pour établir l'explication d'eux-mêmes. Pour cette raison, l'analyse de l'exergie ou génération de l'entropie

pourra changer la route pour qualifier la durabilité, en particulier pour les considérations des aspects énergétiques et écologiques.

Spécifiquement, l'analyse de l'exergie est une application systématique des deux principes de la thermodynamique pour effectuer l'optimisation énergétique des systèmes industriels et aussi socioéconomiques. L'analyse est un outil puissant pour identifier la considération de la qualité de l'énergie de manière claire et précise les points critiques dans un système où l'amélioration énergétique peut-être développée. L'application de l'analyse de l'exergie a été étendue pour l'analyse de différents systèmes, lesquels sont les aspects énergétiques, économiques et écologiques. À partir de là, la considération d'effectuer une analyse de l'exergie dans un système, peut-être amplement utilisée comme une moyenne pour la quantification de la durabilité, et même s'il paraît très sophistiqué, le calcul de l'exergie peut-être plus facile comme nous croyons et est une indication technique précise du degré de réversibilité, c'est-à-dire, de l'effectivité sur la moyenne consensuelle pour l'implémentation et l'opération du système.

En général, ceux-ci les matières de la durabilité et de l'exergie sont présentés dans cette thèse. La thèse est constituée par deux parties et plus d'appendices.

La première partie est constituée par la théorie du développement durable, où le développement historique jusque le travail plus représentatif d'aujourd'hui est présenté. Postérieurement la définition thermodynamique du concept de l'exergie et sa méthode de l'analyse est présentée. En suivant, le lien entre le concept de l'exergie et du développement durable est expliqué pour part de la différente analyse comme : l'Analyse du Cycle de Vie (LCA), l'Analyse du Cycle de Vie Exergique (ELCA), le Cycle de Vie de l'Analyse de l'Exergie (LCEA) et le Modèle de la Quatrième E's (4E's). À la fin de cette première partie, les indicateurs énergétiques de développement durable sont présentés en base au développement de diverses organisations internationales.

Dans la deuxième partie, la situation actuelle du secteur pétrolier mexicain est présentée pour les années 2004, ici, des considérations opératives pour la production des hydrocarbures et pétrochimiques a été considérée. En suivant, les résultats pour le Pemex en face à l'analyse de l'exergie de chaque un de ses subsidiaires sont présentés ; en plus, les Bilans de l'Exergie sont représentés dans un Diagramme de Grassman pour chaque subsidiaire et aussi pour le Pemex comme un cas général. Postérieurement, la définition des indicateurs de durabilité exergique (ISEx) par chaque un des ses dimensions sont établis, lesquels ces sont en correspondance pour la dimension économique, la dimension écologique et la dimension énergétique. Finalement, les conclusions et les recommandations finales sont données.

Pour l'appendice, ils sont constitués par une série de dérivations thermodynamiques sur le concept de l'exergie, une base de donner pour le calcul des émissions de l'exergie et la méthodologie de calculs pour le développer des indicateurs de durabilité exergique.

L'usage de l'analyse de l'exergie devra, sans restriction, être un outil indispensable pour la détermination du niveau de la durabilité de n'importe quelle system, où pourront comprendre tous et chacun des aspects énergétiques, économiques et écologiques.

Prólogo

Esta tesis fue desarrollada en el Grupo de Exergia del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), bajo la dirección del Dr. Ricardo Rivero Rodríguez.

El proyecto de tesis fue desarrollado bajo el marco del proyecto D.00018 “Investigación y Desarrollo Tecnológico de Torres de Destilación Diabática” dentro del Programa de Investigación en Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS) del IMP. Además, este proyecto de tesis contó con el apoyo económico que otorga el IMP a través de su Programa para la Formación de Recursos Humanos de la Industria Petrolera.

Asimismo, durante la realización del proyecto de tesis también se contó con el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por medio de su programa de Becas para Estudios de Posgrado.

El formato de esta tesis cumple con los estándares de edición del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Adicionalmente a los estándares, aquí se muestra un formato muy personal por parte del autor, en el cual se incorporan contextos editoriales poco vistos en una tesis de maestría los cuales corresponden en contar con un resumen en tres idiomas, un prólogo por parte del autor y un pequeño resumen al inicio de cada capítulo.

Por otro lado, para llevar a cabo una investigación científica se requiere de información, y para ello, fue necesario hacer una búsqueda extensiva en diferentes fuentes informáticas. Hoy en día una herramienta muy útil es el Internet, el cual fue de gran ayuda para obtener de manera rápida y práctica información necesaria. Sólo por mencionar algunas fuentes, se consultaron las páginas electrónicas (webpage) de distintas organizaciones nacionales e internacionales como son: Petróleos Mexicanos (Pemex), Secretaría de Energía (Sener), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Internacional Energy Agency (IEA), World Energy Council (WEC), United States Department of Energy (DoE), United Nations (UN), Organización de Estados Americanos (OEA), Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), British Petroleum (BP), Energy Technology Data Exchange (ETDE), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), etc. En algunas de ellas fue necesario solicitar contraseñas personales para ingresar a sus bancos de información.

Sin lugar a duda, y sin romper con la tradición, la mayoría de la información consultada en la realización de esta tesis proviene de libros y artículos científicos publicados en revistas y memorias de congresos internacionales.

La tesis está dividida en dos partes, en las cuales se comprenden ocho capítulos. La primera parte corresponde a los capítulos I al IV y la segunda parte a los capítulos V a VIII. Asimismo, contempla una sección de Apéndices, siendo un total de siete apéndices.

Finalmente, quiero agradecer a todas y cada una de las personas que me dieron su apoyo para la realización de esta tesis; especialmente al Dr. Ricardo Rivero por su confianza y amistad para seguir luchando y darme la oportunidad de empaparme en este maravilloso mundo de la investigación científica. Adicionalmente, quiero agradecer a los organismos nacionales e internacionales por su apoyo económico y profesional para asistir y participar como ponente en congresos de carácter energético como son: World Energy Council, International Association for Energy Economics, Energex Conferences, ECOS International Conferences, Asociación Mexicana para la Economía Energética, Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, y por su puesto a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto Mexicano del Petróleo.

Joel Hernández Santoyo

México, D. F., octubre de 2006.

Índice

	Pág.
RESUMEN	5
ABSTRACT	8
RÉSUMÉ	10
PRÓLOGO	13
ÍNDICE	15
NOMENCLATURA	18
LISTA DE FIGURAS	20
LISTA DE TABLAS	21
ABREVIATURAS	22
INTRODUCCIÓN	23
PRIMERA PARTE	
CAPÍTULO I. SOBRE DESARROLLO SUSTENTABLE: PASADO, PRESENTE Y LA ENERGÍA	28
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA SUSTENTABILIDAD	29
1.2 EL CONCEPTO DE DESARROLLO SUSTENTABLE	30
1.2.1 EL REPORTE DE LA COMISIÓN BRUNDTLAND	31
1.2.2 LA CUMBRE DE RÍO	32
1.2.3 EL PROTOCOLO DE KIOTO	33
1.2.4 CUMBRE MUNDIAL SOBRE DESARROLLO SUSTENTABLE: JOHANNESBURGO 2002	35
1.3 SOBRE EL DESARROLLO ENERGÉTICAMENTE SUSTENTABLE	36
1.4 EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO - MDL	38
1.4.1 CICLO DE UN PROYECTO MDL	39
1.4.2 LOS COSTOS DE TRANSACCIÓN, RIESGOS Y FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS MDL	40
CAPÍTULO II. EL CONCEPTO DE EXERGIA Y SU MÉTODO DE ANÁLISIS	43
2.1 SURGIMIENTO DEL CONCEPTO DE EXERGIA	44
2.2 DEFINICIÓN DE EXERGIA	45
2.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA	46
2.2.2 LA EXERGIA	51
2.3 EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE EXERGIA	54
2.4 EL ANÁLISIS EXERGOECONÓMICO	58
2.5 EL ANÁLISIS EXERGOECOLÓGICO	59
2.6 ALGUNAS APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE EXERGIA	61

CAPÍTULO III. VÍNCULO ENTRE EXERGIA Y DESARROLLO SUSTENTABLE	63
3.1 GENERALIDADES	64
3.2 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA - LCA	65
3.3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EXÉRGICO - ELCA	68
3.4 ANÁLISIS DE EXERGIA DEL CICLO DE VIDA - LCEA	69
3.5 EL MODELO DE LAS CUATRO E's	71
CAPÍTULO IV. INDICADORES DE DESARROLLO SUSTENTABLE: EL ASPECTO ENERGÉTICO.	76
4.1 TEORÍA DE LOS INDICADORES DE DESARROLLO SUSTENTABLE	77
4.2 INDICADORES PARA EL DESARROLLO ENERGÉTICO SUSTENTABLE - ISED	79
4.2.1 INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA EN EL ESQUEMA PER.	79
4.2.2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA OLADE/CEPAL/GTZ	82
4.3 INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA EN MÉXICO	85
 SEGUNDA PARTE	
CAPÍTULO V. EL SECTOR PETROLERO EN MÉXICO	91
5.1 EL PETRÓLEO Y SU CONTEXTO INTERNACIONAL	92
5.2 EL SECTOR PETROLERO EN MÉXICO	94
5.2.1 PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN - PEP	95
5.2.2 PEMEX REFINACIÓN - PR	96
5.2.3 PEMEX GAS Y PETROQUÍMICA BÁSICA - PGPB	99
5.2.4 PEMEX PETROQUÍMICA - PPQ	101
5.3 LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN EL SECTOR PETROLERO MEXICANO	103
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE EXERGIA DEL SECTOR PETROLERO MEXICANO	106
6.1 CONSIDERACIONES GENERALES	107
6.2 ANÁLISIS DE EXERGIA DE PEMEX: PEP, PR, PGPB Y PPQ	110
6.2.1 ANÁLISIS DE EXERGIA DE PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN - PEP	110
6.2.2 ANÁLISIS DE EXERGIA DE PEMEX REFINACIÓN - PR	113
6.2.3 ANÁLISIS DE EXERGIA DE PEMEX GAS Y PETROQUÍMICA BÁSICA - PGPB	114
6.2.4 ANÁLISIS DE EXERGIA DE PEMEX PETROQUÍMICA - PPQ	116
6.3 ANÁLISIS DE EXERGIA GENERAL DE PEMEX	118

CAPÍTULO VII. INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA (ISEx)	123
7.1 DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA	124
7.1.1 DIMENSIÓN ECONÓMICA	125
7.1.2 DIMENSIÓN ECOLÓGICA	125
7.1.3 DIMENSIÓN ENERGÉTICA	126
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA	127
7.2.1 ANÁLISIS DE AUTARQUÍA EXÉRGICA	128
7.2.2 ANÁLISIS DE INTENSIDAD EXÉRGICA	128
7.2.3 ANÁLISIS DE FORTALECIMIENTO DE LA CALIDAD ENERGÉTICA	129
7.2.4 ANÁLISIS DE PUREZA DE USO EXÉRGICO	130
7.2.5 ANÁLISIS DE INTENSIDAD EXÉRGICA DE CO ₂	131
7.2.6 ANÁLISIS DE PÉRDIDA EXÉRGICA VINCULADA A PRODUCTOS	132
7.2.7 ANÁLISIS DE CONSUMO EXÉRGICO	132
7.2.8 ANÁLISIS DE USO EFECTIVO DE CALIDAD ENERGÉTICA	133
7.2.9 ANÁLISIS DE MEJORAMIENTO GERMINAL	134
7.3 RESULTADOS GRÁFICOS DE LOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA	135
7.3.1 PATRONES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA DE PEP, PR, PGPB Y PPQ	135
7.3.2 ANÁLISIS GENERALE DE LOS PATRONES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA	138
7.4 INDICADORES GENERALES DEL SECTOR PETROLERO MEXICANO: PEMEX	139
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES GENERALES	143
8.1 CONCLUSIONES GENERALES	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
APÉNDICES	155
APÉNDICE A. DERIVACIÓN TERMODINÁMICA DEL CONCEPTO DE EXERGIA	156
APÉNDICE B. DERIVACIÓN TERMODINÁMICA DE LAS PÉRDIDAS DE EXERGIA	159
APÉNDICE C. ANÁLISIS DE EXERGIA DE UNA CALDERA DE VAPOR	161
APÉNDICE D. ANÁLISIS DE EXERGIA DEL SISTEMA NACIONAL DE REFINACIÓN	167
APÉNDICE E. EMISIONES Y CONSUMO DE ENERGÍA DE PEMEX	168
APÉNDICE F. DESARROLLO DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EXÉRGICA	170

Nomenclatura

Q	Calor	[kJ]
W	Trabajo	[kJ/s]
U	Energía interna	[kJ]
E	Energía	[kJ]
H	Entalpia	[kJ/kg]
p	Presión	[kg/cm ²]
V	Volumen	[m ³]
v	Velocidad	[m/s]
z	Distancia	[m]
S	Entropía	[kJ/kg K]
T	Temperatura	[°C]
η	Eficiencia	[%]
Ex	Exergía	[kJe]
An	Anergía	[kJ]
ex	Exergía específica	[kJe/mol]
M	Masa	[kg]
X	Composición	[mol]
μ	Potencial químico	
Irr	Irreversibilidades	[kJe]
Pex	Pérdidas totales de exergía	[kJe]
ε	Efectividad	[%]
ξ	Rendimiento	[%]
Pot	Potencial de mejoramiento	[kJe]
C	Costo	[\$/s]
Z	Flujo monetario	[\$/s]
t	Tiempo	[s]
F	Costo de capital	[\$]
PP	Producción de contaminantes	
Potec	Potencial de mejoramiento exergoecológico	[kJe]
λ	Factor de contaminación	
PM	Peso molecular	[g/mol]

subíndices

k	cinética
p	potencial
0	estado de referencia
rev	reversible
w	trabajo
h	calor
m	materia
f	física
q	química
tte	total a la entrada
tts	total a la salida
nts	neta total suministrada
ntp	neta total producida

tfl	total de efluentes
uts	útil total a la salida
i	número de bloque [1.....∞]
n	años
j	especie j
ec	ecológico
efl	efluente
eq	equilibrio

superíndice

k	especie superior
o	estándar

Lista de Figuras

Figura 1.1 Propuestas del Reporte Brundtland	32
Figura 1.2 La Agenda 21	33
Figura 1.3 Los Diez Planes de Acción de Johannesburgo	36
Figura 1.4 Ciclo de un Proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	40
Figura 2.1 Máquina térmica (MT) operando entre dos fuentes de energía (T_{alta} y T_{baja}) y con liberación de trabajo (W_{neto}) a la fuente de energía mecánica	50
Figura 2.2 Exergia de la materia	54
Figura 2.3 Método de bloques para el análisis de exergia	55
Figura 3.1 Los cuatro principales pasos de un LCA	66
Figura 3.2 Cadena de conversión energética	67
Figura 3.3 Uso de exergia durante el ciclo de vida de un sistema	70
Figura 3.4 Modelo de las Cuatro E's (energía-economía-ecología-educación)	73
Figura 3.5 (a) Modelo energía-economía-educación, (b) Modelo energía-ecología-educación, (c) Modelo economía-ecología-educación	74
Figura 4.1 Relaciones entre las dimensiones sustentables del sector energético	82
Figura 4.2 Indicadores de sustentabilidad energética para México en 1999	84
Figura 4.3 Indicadores de sustentabilidad energética para México en 2002	88
Figura 6.1 Balance de exergia de Pemex Exploración y Producción (PEP)	112
Figura 6.2 Balance de exergia de Pemex Refinación (PR)	114
Figura 6.3 Balance de exergia de Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)	116
Figura 6.4 Balance de exergia de Pemex Petroquímica (PPQ)	118
Figura 6.5 Balance de exergia del Sector Petrolero Mexicano	121
Figura 7.1 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PEP	136
Figura 7.2 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PR	136
Figura 7.3 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PGPB	137
Figura 7.4 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PPQ	137
Figura 7.5 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para Pemex	141
Figura A.1 Sistema A en un medio ambiente A_0	156
Figura B.1 Esquema de las corrientes de un proceso	160
Figura C.1 Esquema general de una caldera de vapor	161

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Investigadores alrededor del mundo que aplican el concepto de exergia	46
Tabla 4.1 Países voluntarios del programa piloto para el desarrollo de IDS	78
Tabla 4.2 Dimensiones de sustentabilidad energética	81
Tabla 4.3 Indicadores para la sustentabilidad en términos energéticos	85
Tabla 4.4 Posibles indicadores de sustentabilidad energética para México en el esquema PER	86
Tabla 4.5 Indicador de autarquía energética para México del año 2004	87
Tabla 5.1 Clasificación del petróleo de acuerdo a su densidad API	92
Tabla 5.2 Capacidad instalada por refinería al año 2004	98
Tabla 5.3 Capacidad de producción por centro de procesamiento de gas de PGPB en el año 2004	100
Tabla 5.4 Capacidad de producción de complejos petroquímicos en el año 2004	102
Tabla 6.1 Poder calorífico y exergia química estándar de algunos hidrocarburos y petroquímicos	109
Tabla 6.2 Parámetros exérgicos para Pemex Exploración y Producción (PEP)	111
Tabla 6.3 Parámetros exérgicos para Pemex Refinación (PR)	114
Tabla 6.4 Parámetros exérgicos para Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)	115
Tabla 6.5 Parámetros exérgicos para Pemex Petroquímica (PPQ)	117
Tabla 6.6 Parámetros exérgicos generales para Pemex	120
Tabla 7.1 Indicadores de autarquía exérgica	128
Tabla 7.2 Indicadores de intensidad exérgica	129
Tabla 7.3 Indicadores de fortalecimiento de la calidad energética	130
Tabla 7.4 Indicadores de pureza de uso exérgico	130
Tabla 7.5 Indicadores de la intensidad exérgica de CO ₂	131
Tabla 7.6 Indicadores de pérdida exérgica vinculada a productos	132
Tabla 7.7 Indicadores de consumo exérgico	133
Tabla 7.8 Indicadores de uso efectivo de calidad energética	134
Tabla 7.9 Indicadores de mejoramiento germinal	134
Tabla 7.10 Indicadores de Sustentabilidad Exérgica de Pemex	140
Tabla D.1 Parámetros exérgicos del Sistema Nacional de Refinación para el año 2004	167
Tabla E.1 Emisión de gases y consumo de energía de Pemex	168

Abreviaturas

API	American Petroleum Institute
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CExC	Cumulative Exergy Consumption
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
COP	Conferencia de las Partes
EB	Executive Board
ELCA	Exergetic Life Cycle Analysis
EOD	Entidad Operacional Designada
GTZ	Deutsche Gessellschaft fur Technishche Zusammenarbeit / Agencia Alemana de Cooperación Técnica
IAEA	International Atomic Energy Agency
IDS	Indicadores de Desarrollo Sustentable
IEA	International Energy Agency
IGSEx	Indice General de Sustentabilidad Exérgica
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
ISED	Indicators for Sustainable Energy Development
ISEx	Indicadores de Sustentabilidad Exérgica
IUCN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
LCA	Life Cycle Analysis
LCEA	Life Cycle Exergy Analysis
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
ONG	Organización no Gubernamental
Pemex	Petróleos Mexicanos
PEP	Pemex Exploración y Producción
PER	Presión-Estado-Respuesta
PGPB	Pemex Gas y Petroquímica Básica
PMI	Petróleos Mexicanos Internacionales
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente
PPQ	Pemex Petroquímica
PR	Pemex Refinación
RCE	Reducciones Certificadas de Emisiones
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SNR	Sistema Nacional de Refinación
UN	United Nations
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNCSD	United Nations Commission of Sustainable Development
WB	The World Bank
WCED	World Commission on Environment and Development
WEC	World Energy Council
WPISD	World Programme on Indicators of Sustainable Development
WSSD	World Summit on Sustainable Development

Introducción

El trabajo de tesis presentado aquí, está centrado en el estudio de la evaluación del nivel de sustentabilidad del sector petrolero mexicano a partir del uso del método de análisis de exergia. Específicamente, se desarrollaron Indicadores de Sustentabilidad Exérgica (ISEx) para Petróleos Mexicanos (Pemex), en donde se demuestra el nivel que guarda cada una de sus subsidiarias dentro las dimensiones económicas, ecológicas y energéticas.

El análisis de exergia es una metodología de evaluación basada sobre los dos principios de la termodinámica (sobre todo más por el segundo principio) para determinar la calidad de la energía y reducir la degradación de ésta, la cual se presenta en todo proceso real. Su método de análisis no solamente se puede establecer en sistemas energéticos, sino también en sistemas económicos, ecológicos y sociales. Aunque la relación entre cada uno de ellos es compleja, la exergia puede ayudar a mejorar sus puntos críticos.

Por su parte, el tema de desarrollo sustentable ha sido uno de los principales focos de atención de los países por tratar de mejorar la calidad vida y reducir el impacto del medio ambiente. Hasta hoy, muchos esfuerzo para contrarrestar dichos impactos se han sostenido con el desarrollo de programas, protocolos y convenciones alrededor del mundo, sin embargo, pareciera que en términos absolutos no se han logrado los resultados esperados. Un ejemplo de ello es el acelerado cambio climático, por lo que no es casualidad que hoy se padezca con mayor frecuencia los problemas medio ambientales. En consecuencia, aún cuando el concepto de sustentabilidad sea cada vez más conocido y empleado, pasando a ser casi obligatorio referirse a él en las propuestas de cambio y desarrollo de todo tipo de sistemas, en verdad pareciera que está resultando complicado la cuantificación del mismo, o sea, en la medición de cuánto un determinado proceso o un sistema es sostenible. Quizás una de las primeras dificultades para su cuantificación sea exactamente la amplitud de ideas que conlleva la propuesta de *“asegurar que nuestras acciones presentes no afectarán las oportunidades de bienestar y calidad de vida para las próximas generaciones”*.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo central demostrar el vínculo que existe entre el concepto de exergia, y su método de análisis, con la definición del desarrollo sustentable por medio de la generación de diversos ISEx, los cuales permitan la cuantificación del nivel sostenible (o sustentables) del sector petrolero mexicano.

Como objetivos particulares, se realizará un análisis de exergia de cada uno de las subsidiarias de Pemex y se desarrollarán indicadores que califiquen el nivel de sustentabilidad de cada una de ellas desde las dimensiones económicas, ecológicas y energéticas.

Por otro lado, este estudio plantea como hipótesis que el sector petrolero mexicano presenta diversos problemas de sustentabilidad debido a: la falta de inversión en alguna de sus subsidiarias para la modernización de su infraestructura; la inconveniencia de cambiar el régimen fiscal la cual imposibilita su autonomía de gestión; la continua política energética de ser un sector exportador de materia prima valiosa como es el petróleo y verse en la necesidad de importar productos con mayor valor agregado para satisfacer su demanda interna; la incompetencia en tratar de ser líderes mundiales en investigación y desarrollo tecnológico de la industria petrolera. Estos factores son, sin lugar a duda, una llamada de atención a los actores políticos para tomar decisiones adecuadas y confiables para lograr entonces sí un verdadero desarrollo sustentable del sector petrolero nacional.

Para hacer posible este estudio, fue necesario recurrir a diversas fuentes de información, en donde imperó la recopilación de artículos científicos, reportes, comunicados de prensa, libros, memorias de congresos, las cuales mantienen un manejo de carácter público. Asimismo, se hizo una extensa búsqueda en Internet, visitando diversas páginas electrónicas de organismos nacionales e internacionales.

La tesis está constituida por ocho capítulos y una serie de apéndices. El primer capítulo presenta la definición del desarrollo sustentable, partiendo de su reseña histórica hasta la explicación de uno de los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto para impulsar la reducción de emisión de gases efecto invernadero.

El segundo capítulo está dedicado a explicar el análisis de exergia, partiendo de la creación de su concepto, su definición termodinámica, su método de análisis y la presentación de algunas de sus aplicaciones más relevantes.

El tercer capítulo aborda el vínculo que existe entre el concepto de exergia y la definición del desarrollo sustentable. Se presentan algunas generalidades, así como diversos estudios que relacionan a la exergia con la sustentabilidad como: el estudio del Ciclo de Vida, el Análisis del Ciclo de Vida Exérgico (ELCA), el Análisis de Exergia del Ciclo de Vida (LCEA) y el Modelo de las Cuatro E's (4E's).

En el cuarto capítulo se presentan algunos de los indicadores de desarrollo energético sustentable que han sido propuestos por diversos organismos internacionales, en los que imperan los indicadores de las Naciones Unidas, la Agencia Internacional de Energía Atómica y la OLADE/CEPAL/GTZ. Además se presentan los indicadores de sustentabilidad energética para México los cuales fueron desarrollados como una propuesta para conocer el nivel de sustentabilidad que guarda el país.

El quinto capítulo trata de la situación que mantuvo el sector petrolero mexicano durante el año 2004 específicamente. Se aborda el tema del petróleo y su contexto internacional de manera general, la situación operativa que mantuvo cada una de las subsidiarias de Pemex, y finalmente una breve explicación de la situación actual y futura de la investigación y desarrollo tecnológico para dicho sector.

El capítulo seis presenta los resultados del análisis de exergía desarrollado a cada una de las subsidiarias de Pemex. Inicialmente se dan las consideraciones generales para su análisis, y posteriormente se dan a conocer los resultados mostrando los parámetros exérgicos y los Diagramas de Grassman de Balance de Exergía para cada subsidiaria. En la parte final de este capítulo, se muestra en manera de resumen, los resultados totales de Pemex así como el Diagrama de Balance de Exergía general.

En el capítulo siete, se da a conocer el desarrollo de los ISEx, comenzando por la identificación de cada uno de ellos acorde a tres dimensiones, siendo éstas la dimensión económica, la dimensión ecológica y la dimensión energética. Tales indicadores fueron evaluados para cada una de las subsidiarias de Pemex y representados en diagramas de patrón de sustentabilidad, los cuales muestran con mayor facilidad el nivel de sustentabilidad que guarda cada una de ellas. Adicionalmente, se presentan los indicadores y el diagrama de patrón de sustentabilidad para Pemex en su totalidad.

El capítulo ocho presenta las conclusiones generales.

La parte de apéndices está constituida por siete apéndices, en donde se presenta: la derivación termodinámica del concepto de exergía, la derivación termodinámica de las pérdidas de exergía, el análisis de exergía de una caldera de vapor, el resultado de los parámetros exérgicos del Sistema Nacional de Refinación (SNR), los datos de emisiones de gases y consumos de energía de Pemex, y el desarrollo metodológico de los indicadores de sustentabilidad exérgica.

PRIMERA PARTE

Capítulo I

Sobre Desarrollo Sustentable: pasado, presente y la energía.

En este primer capítulo se presenta el concepto de desarrollo sustentable, partiendo de una reseña histórica de la sustentabilidad, la definición a través de los trabajos hechos por organismos internacionales, los programas actuales para su ejecución y las perspectivas hacia el futuro. Asimismo, se presenta el papel que juega la energía en cada dimensión del desarrollo sustentable, identificando el sector energético mundial y los aspectos económicos, sociales y ecológicos. Finalmente, se presenta información general del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), en donde se da a conocer el ciclo de un proyecto MDL y los costos de transacción, los riesgos y el financiamiento de los mismos.

1.1 Reseña Histórica de la Sustentabilidad.

Los antecedentes que se tienen sobre el impacto que el hombre ha provocado al medio natural hoy en día es esencialmente la historia de la sustentabilidad, el cual es descrito por un amplio recorrido a través del tiempo.

Desde la invención de la rueda hace 4,000 años por el imperio Sumerio, ya se daban vestigios del deterioro del entorno natural. El declive de la producción agrícola dificultaba la alimentación de las ciudades a causa de la irrigación salina del agua y el crecimiento de tierras áridas, así como problemas surgidos por la inundación del Nilo en Egipto. Alrededor de 2,400 años atrás, en el occidente se tenían reflexiones evidentes sobre la naturaleza en mitos, poemas épicos, juicios líricos y filosóficos; entre éstos se encuentran escritores como Platón, Hipócrates (460 a. C.),¹ Aristóteles (348 a. C.), Theophrastus (370 a. C.). En el oriente, el pensamiento de Confucio (nacido 2,500 años atrás) sobre los vínculos cerrados entre el ser humano y su medio ambiente lo presentaba como una característica clave, el cual fue seguido por el discípulo Meng Kho y el filósofo Lao Tse. En el transcurso de los 2000 años atrás, el enfoque humano sobre el mundo natural en la tradición occidental fue bastante menor aún. La sequía en Asia Central y Occidental (300 d. C.) se presentaba por el colapso de los sistemas de riego y erosión del suelo, siendo un elemento en el colapso de la agricultura. Esto al mismo tiempo se presentaba en Irán, Golfo Árabe y Yemen. Ya en la era de América-precolombina, los pueblos nativos fueron astutos observadores de la naturaleza, siendo notable la domesticación de las plantas y los animales; los Mayas para el año 900 usaron la tierra para la producción de alimentos bajo un esfuerzo excesivo. Para el año 1180, las áreas del norte de Europa, comenzaban a resentir el cambio climático debido al enfriamiento del Ártico, lo que provocaría cambios en la vegetación y escasez de alimento, siendo que a principios de los 1300's se hiciera extensa la hambruna y enfermedades severas. A mediados de los 1400's se presentaba nuevamente la hambruna, los problemas sociales y ambientales y la migración extensa de civilizaciones de Rusia y Europa. En el periodo de 1550 a 1700 hubo un surgimiento por el mejoramiento de la agricultura en Asia y Europa al introducir nuevos métodos en ella [1].

La creciente preocupación de los problemas ambientales hizo que la ciencia fuera cada vez más importante en el estudio de los fenómenos naturales. Científicos como Edmé Mariotte (1681), Abbé Jean-Baptiste du Bos (1720) y Jean Joseph Fourier (1822) se adentraron en el estudio de las ciencias naturales, siendo este último, el primero que describió el calentamiento de la atmósfera terrestre por la

¹ a. C.: antes de Cristo; d. C.: después de Cristo.

acción del efecto invernadero.² En este siglo, otro investigador como John Tyndall (con su investigación de la reactividad de los gases, 1859) y Svante August Arrhenius (sobre el cambio de la concentración atmosférica de bióxido de carbono, 1895), iniciaron las bases científicas para el estudio del efecto invernadero vinculado con emisiones de bióxido de carbono e incremento en la temperatura atmosférica. La principal fuente histórica en las emisiones de la actividad humana se centra en el uso de carbón,³ seguido del uso del petróleo y gas natural. Hasta entonces, la identificación de la degradación del medio ambiente se presenta como un problema global y a principios del siglo XX el concepto de sustentabilidad fue aplicado en el manejo de los bosques y la vida silvestre [2]. A mediados de ese siglo, la evidencia de que las especies y comunidades naturales no se recuperarán de la destrucción excesiva hizo más intenso el trabajo sobre el cuidado del entorno. Ya para el último tercio del siglo, se llegó a la creación de distintos planes de trabajo para dar soluciones a los problemas medioambientales, sociales, económicos y energéticos por medio del concepto y definición del desarrollo sustentable.

1.2 El Concepto de Desarrollo Sustentable.

El concepto de Desarrollo Sustentable ⁴ surgió en la década de los años ochenta, aunque en 1972 se daban ya los primeros indicios de esta nueva visión con la celebración de la primera reunión mundial sobre medio ambiente llamada “Conferencia sobre el Medio Humano”, celebrada en Estocolmo, Suecia, en donde se discutió por primera vez lo que se llamaría el “Entorno Global” [3].

La idea del desarrollo sustentable como tal fue planteada primero por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) en 1980 [4], cuando se dio a conocer la Estrategia Mundial de Conservación, la cual puntualizaba la sustentabilidad ⁵ en términos ecológicos, pero con muy poco énfasis en el desarrollo económico por lo que fue tachada de antidesarrollista. En consecuencia, a través de otros organismos internacionales como la Comisión para el Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas (UNCSD), la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (WCED, por sus siglas en inglés), el

² Trabajo presentado con el título “Théorie analytique de la chaleur”, y en 1824 da a conocer “Remarques générales sur la température du globe terrestre et des espaces planétaires”.

³ El carbón que reemplazó a la madera como fuente de energía, se utilizó principalmente en la ciudad de Londres, Inglaterra, en los años 1200’s.

⁴ Un término usado aún después de la declaración de Cocoyoc sobre Medio Ambiente y Desarrollo a principios de los 70’s [1].

⁵ En las décadas de los 80’s y 90’s, se introduce en la literatura ecológica el término de “sustentabilidad” para calificar el desarrollo y el crecimiento económico, especialmente referido a los países en vías de desarrollo sensibles a los problemas ambientales.

Programa Mundial de las Naciones Unidas sobre Indicadores de Desarrollo Sustentable (WPISD, por sus siglas en inglés), el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), el Banco Mundial (WB, The World Bank), la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Consejo Mundial de Energía (WEC, World Energy Council), el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), por mencionar algunos, se ha impulsado la aplicación del concepto de desarrollo sustentable en todo el mundo por medio de foros, reuniones, congresos, programas, cumbres, reportes, etc.

En este contexto, los siguientes párrafos presentan algunos de los trabajos más importantes en las últimas décadas que han propuesto la definición del desarrollo sustentable y su aplicación en el contexto general.

1.2.1 El Reporte de la Comisión Brundtland.

Es común asociar el concepto de sustentabilidad con un reporte publicado en 1987: “Nuestro Futuro Común: La Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo” o “Reporte Brundtland” (encabezado por quien fuera la Primer Ministro de Noruega, la Dra. Gro Harlem Brundtland, y Ex - Secretaria General de la Organización Mundial de la Salud). Este reporte define el concepto de Desarrollo Sustentable como: *“El desarrollo que conoce las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades”* [5].

El reporte puede describirse como una llamada a la ética de la comunidad internacional y el compromiso de preservar valores globales que puedan ir más allá de las fronteras entre naciones, las razas y la religión (ver Figura 1.1). Exhorta a iniciar una nueva era de desarrollo económico racional desde el punto de vista ecológico. Declara que el desarrollo sustentable es posible, que debe ser aplicado al manejo de la economía, la tecnología y los recursos naturales, y que, además, requiere de un cambio masivo en los objetivos de la sociedad [6]. Una crítica al reporte es que este establece una amplia agenda para el cambio sin confrontar la múltiples barreras que existen para alcanzar esas metas.

El informe es el resultado de dos décadas de trabajo en donde se identificó que no se pueden considerar sustentables sociedades y economías saludables en un mundo con tanta pobreza y degradación del medio ambiente [7]. Si bien, el desarrollo económico de las naciones no se puede detener, es necesario que sea

menos destructivo en el sentido ecológico. La Comisión estableció que la economía global, con el hecho de satisfacer las necesidades y deseos legítimos de la sociedad, tiene como prioridad los límites ecológicos del planeta y las necesidades de las generaciones futuras [8]. En este sentido, el papel rector de la Organización de las Naciones Unidas (UN, por sus siglas en inglés) en materia de medio ambiente, hizo patente en 1987 la firma del Protocolo de Montreal⁶ así como la Convención de Basilea en 1989 [9]. En diciembre de ese año, la UN inició la planificación de la Conferencia sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, en la que se trazarían los principios para alcanzar un desarrollo sustentable; durante dos años, un gran número de expertos en todo el mundo se dedicó con ahínco a la concertación de acuerdos que abrieron el camino a la Cumbre de Río de Janeiro, Brasil.

1.2.2 La Cumbre de Río.

La Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED, por sus siglas en inglés), conocida como “La Cumbre de la Tierra” o “La Cumbre de Río” se llevó a cabo en la Ciudad de Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992 [10]. Reunió a jefes de estado, diplomáticos, científicos, representantes de los medios y de las Organizaciones no Gubernamentales (ONG’s) de 179 países del mundo, en un esfuerzo común por articular las relaciones entre el medio ambiente, las sociedades y la economía. La Cumbre tuvo como propósito establecer una alianza mundial novedosa y equitativa mediante la creación de distintos niveles de cooperación entre los estados, los sectores claves de la sociedad y las personas, por medio de acuerdos internacionales que tienen como meta anteponer los intereses de la humanidad y la protección integral del sistema ambiental y del desarrollo mundial sobre los sistemas de desarrollo actual de las naciones.

Figura 1.1
Propuestas del Reporte Brundtland

El reporte incluyó propuestas para:

- Reforma del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas para que sea representativo y mantenga legitimidad y credibilidad.
- Creación de un Consejo de Seguridad Económico para tener un programa efectivo y democrático de la economía mundial.
- Establecimiento de una Fuerza de Voluntarios de las Naciones Unidas para que el Consejo de Seguridad pueda actuar rápidamente en emergencias.
- Preservación de la custodia de los objetivos globales comunes expresados en el Comité de Confianza Mutua.
- Inclusión de la seguridad de las personas y del planeta al mismo nivel de importancia que la seguridad de las naciones.
- Seguimiento del estado de derecho y el apoyo para la observación de las leyes alrededor del mundo.
- Inclusión de la voz de la sociedad civil dentro de los gobiernos.
- Búsqueda de nuevas formas para obtener mayor financiamiento para propósitos globales.

FUENTE: Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas.

⁶ El Protocolo de Montreal establece la limitación en la producción de sustancias que disminuyen la capa de ozono como los llamados Clorofluorocarbonos (CFC’s).

En este foro, que marcó un hito en materia de negociación global sobre el desarrollo sustentable, se adoptaron importantes instrumentos internacionales como La Convención de Diversidad Biológica y La Convención Marco sobre Cambio Climático, que obliga a los estados que los han ratificado, a desarrollar medidas de política y legislación en aspectos considerados “estratégicos” en el nivel global [11]. Asimismo, se produjeron otros instrumentos no vinculantes como Los Principios sobre Bosques y La Agenda 21 [12],⁷ donde ésta última constituye un Plan de Acción que integra los más diversos temas sobre desarrollo sustentable (ver Figura 1.2).

Después de transcurridos diez años de la Cumbre de Río, se celebró la Cumbre llamada Río + 10 en el año 2002, en Johannesburgo, Sudáfrica.

1.2.3 El Protocolo de Kioto.

Un protocolo es considerado, entre otros, una serie de escrituras matrices y otros documentos de un poder jurídico autoriza y custodia con ciertas formalidades. Por lo tanto, el Protocolo de Kioto es un documento que comparte las preocupaciones y los principios establecidos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), pero establece asimismo compromisos más concretos y detallados que los estipulados por el CMNUCC.

Figura 1.2 La Agenda 21

La Agenda 21 presenta las políticas y los programas para alcanzar un desarrollo balanceado entre el consumo, la población y la capacidad de la Tierra para mantener la vida de todas las especies. En ella se describen algunas tecnologías y técnicas que requieren ser desarrolladas para proveer satisfacción de las necesidades humanas al mismo tiempo de hacer un manejo cuidadosos de los recursos naturales.

Un tema prioritario de la Agenda 21, fue la necesidad de erradicar la pobreza, posibilitando el acceso de los pobres a los recursos que necesitan para vivir de manera sustentable. Los países industrializados reconocen que tienen una mayor responsabilidad en la recuperación del ambiente de los países pobres que provocan relativamente una menor contaminación. Las naciones ricas también se han comprometido a proporcionar mayores recursos para ayudar a otras naciones a desarrollarse con un menor impacto ambiental. Además del financiamiento, se comprometen apoyar a las naciones para que adquieran la experiencia en plantear y llevar a cabo decisiones de desarrollo sustentable.

El mencionado documento, designa el liderazgo a los gobiernos de las naciones pero establece la necesidad de la participación de organismos internacionales, el sector privado, y los gobiernos regionales, estatales y provisionales, así como grupos ciudadanos y organizaciones no gubernamentales. La Agenda 21 contiene 40 Capítulos agrupados en cuatro secciones, como son:

- Sección I. Dimensiones Sociales y Económicas.
- Sección II. Conservación y Manejo de Recursos.
- Sección III. Apoyo para la Participación de Grupos Mayoritarios.
- Sección IV. Formas de Implementación.

⁷ El texto completo de La Agenda 21 se encuentra disponible en: <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21text.html>

El Protocolo de Kioto, adoptado en diciembre de 1997 durante la tercera sesión de la Conferencia de las Partes (COP.3) [13], es el instrumento legal que establece, por primera vez, en compromiso vinculante y específico de la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero para los países desarrollados, incluyendo en ellos a los países en tránsito a economías de mercado. Este protocolo establece en su Anexo B⁸ una limitación o reducción de emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero para un primer periodo de compromiso entre los años 2008 y 2012, mediante un porcentaje de nivel de emisiones que las Partes desarrolladas han tenido en 1990, o en el año determinado para los países en transición.⁹ Asimismo el Protocolo incluye en su Anexo A los siguientes gases como gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), carburos hidrofluorados (HFC) y perfluorados (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF₆).

El efecto que los gases están ejerciendo actualmente sobre el cambio climático es diferente. Así se estima que el CO₂ contribuye en un porcentaje del 60%, el CH₄ es responsable del 15%, el N₂O del 5%, y los otros gases HFC - PFC - SF₆ contribuyen con el 20% restante.

Después de la COP.3 de Kioto de 1997, la comunidad internacional trabajó intensamente para lograr un consenso sobre normas complementarias que facilitaran la implantación del Protocolo de Kioto. Entre los acuerdos más importantes alcanzados hasta diciembre de 2004, son: El plan de Acción de Buenos Aires (COP.4), el Acuerdo Político de Bonn (COP.5 y COP.6Bis), Los Acuerdos de Marrakech¹⁰ (COP.7), La Declaración de Delhi sobre Cambio Climático y Desarrollo Sustentable (COP.8).

Cabe señalar que el Protocolo de Kioto entraría en vigor el nonagésimo día contado desde la fecha en que hayan depositado sus instrumentos de ratificación, aceptación, aprobación o adhesión no menos de cincuenta y cinco Partes en la Convención, entre las que se cuentan Partes del Anexo A y cuyas emisiones totales representan, por lo menos, el 55% de las emisiones de CO₂ de las Partes del Anexo I¹¹ correspondiente a 1990. Por lo tanto, para que el Protocolo de Kioto entrara en vigor, era preciso que lo ratificasen al menos cincuenta y cinco países, y que éstos sean responsables del 55% de las emisiones del año base (Artículo 25 del Protocolo). Como Rusia ha ratificado ya el Protocolo de Kioto el 16 de febrero

⁸ Para mayor información del Anexo A y B del Protocolo de Kioto, consultar la referencia [13].

⁹ Para el caso de los gases CFC, se toma a 1995 como año base.

¹⁰ Asimismo se desarrolló una parte referida a los mecanismos de flexibilidad formada por cuatro Decisiones; una, común, sobre el ámbito y los principios generales de estos mecanismos (Decisión 15/CP.7); y otras tres, relativas a las reglas de funcionamiento de los mecanismos de Aplicación Conjunta (Decisión 16/CP.7), Mecanismos de Desarrollo Limpio - MDL (Decisión 17/CP.7) y Comercio de Emisiones (Decisión 18/CP.7).

¹¹ Las Partes del Anexo I lo conforman los siguientes países: Australia, Austria, Bielorrusia, Bélgica, Bulgaria, Canadá, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Rusia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Ucrania, Reino Unido, Irlanda del Norte, y Estados Unidos.

de 2005, este ha entrado en vigor al haberse cumplido todas las condiciones necesarias para su vigencia.

1.2.4 Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable: Johannesburgo 2002.

Cuando la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó la celebración de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable (WSSD, por sus siglas en inglés) no era ningún secreto que el avance en el logro del desarrollo sustentable había sido extremadamente decepcionante desde la Cumbre de la Tierra de 1992 [14]. La Cumbre Mundial,¹² también conocida como Río + 10, se llevó a cabo en la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica, del 26 de agosto al 4 de septiembre de 2002 [15]. Los gobiernos del mundo, las agencias de la UN, los organismos multilaterales de financiamiento y otros actores y ciudadanos, se reunieron para evaluar la evolución global y el cumplimiento de los compromisos adquiridos desde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

La Cumbre de Johannesburgo puso los cimientos y abrió el camino para la acción, sin embargo, entre las metas, calendarios y compromisos que se acordaron ahí, no ha existido ninguna solución milagrosa en la lucha contra la pobreza y el continuo deterioro del medio ambiente natural. Empero, se presentaron diez planes de acción que fueron tomadas en la Cumbre, teniendo un alto nivel de importancia para la erradicación de la insustentabilidad (ver Figura 1.3).

En la Cumbre se asumieron compromisos no sólo por parte de los gobiernos sino también de las ONG's, de las organizaciones intergubernamentales y de las empresas, con la adopción de más de 300 iniciativas voluntarias [16].

Finalmente, se señalaron cinco esferas fundamentales en las que se podría lograr un verdadero cambio: 1) agua y saneamiento, 2) energía, 3) salud, 4) agricultura y, 5) diversidad biológica (WEHAB, por sus siglas en inglés)¹³ [17]. Esta esfera es un programa ambicioso y de medidas prácticas, el cual podría mejorar la calidad de vida de todos los seres humanos y al mismo tiempo proteger el medio ambiente [18].

¹² Entre los preparativos para la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable, el Secretario General de las Naciones Unidas, Kofi Annan, publicó un informe de 63 páginas en el que se analiza el progreso logrado durante la última década para poner en ejecución el Programa 21; un plan mundial para el desarrollo sustentable que fue aprobado en la Cumbre de la Tierra en 1992, en Río de Janeiro. El informe evalúa las tendencias económicas, sociales y ambientales de los últimos diez años y presenta sugerencias sobre cómo la comunidad internacional puede volver a enfocar sus esfuerzos para alcanzar las metas dispuestas en el Programa 21.

¹³ El Secretario General de la ONU propuso la iniciativa WEHAB para los preparativos de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable para identificar las esferas que podían tener efectos mayores y más amplios en la erradicación de la pobreza, realizando al mismo tiempo los objetivos del desarrollo sustentable.

Figura 1.3
Los Diez Planes de Acción de Johannesburgo

Para encaminar esfuerzos hacia resultados accesibles, se ofreció un plan de diez puntos:

- **Lograr que la mundialización contribuya al desarrollo sustentable.** Figuran la eliminación de subsidios que ocasionan distorsiones en el comercio y un mejoramiento de acceso de los productos y servicios provenientes de países en desarrollo a los mercados de los países desarrollados.
- **Erradicar la pobreza y elevar el nivel de vida.** Es necesario esforzarse para mejorar las condiciones y las oportunidades de los pobres.
- **Cambiar los patrones no sostenibles de producción y consumo.** Conseguir eficiencia energética cuatro veces mayor en las próximas dos o tres décadas.
- **Mejorar la salud.** Acceso a agua potable segura y a precios módicos, así como mejorar la calidad del aire en interiores.
- **Proporcionar acceso a la energía.** En base a la mejora de la eficiencia energética, mediante el desarrollo, el uso de tecnologías energéticas más eficientes y el cambio de patrones insostenibles de consumo de energía.
- **Gestionar los ecosistemas y la biodiversidad.** Aportar soluciones a problemas de pesca desmedida, explotación insustentable de los bosques y contaminación marina desde las áreas continentales.
- **Mejorar la gestión del suministro de agua potable** y lograr una distribución más equitativa de los recursos acuíferos.
- **Proporcionar recursos financieros.** Incrementar la Asistencia Oficial para Desarrollo, la inversión privada, así como la transferencia e intercambio de tecnologías ambientales sensatas.
- **Apoyar el desarrollo sustentable en África.** Enfocar nuevos programas extensivos que conduzcan el.
- **Fortalecer la gobernabilidad internacional.** Promover un enfoque integrado y mundial, en lugar de un enfoque compartido que prevalece para generar el desarrollo sustentable.

1.3 Sobre el Desarrollo Energéticamente Sustentable.

La energía juega un importante papel en cada dimensión del desarrollo sustentable, siendo esto como el vínculo entre la economía, la ecología y la sociedad [19]. La forma en que se producen, distribuyen y utilizan los servicios energéticos afecta a tales dimensiones. No obstante, siendo la energía un tema de conocimiento económico y seguridad nacional, los gobiernos de todo el mundo (principalmente de países industrializados) tienen la responsabilidad de llevar a cabo acciones inmediatas para mejorar los servicios energéticos, identificando primordialmente la protección del medio ambiente. En este contexto, el desarrollo energéticamente sustentable contempla el estudio en áreas como: seguridad energética, mejoramiento de la eficiencia energética, uso de energías renovables, una sana política energética, investigación y desarrollo tecnológico, acceso a la energía, transporte, medio ambiente, salud y seguridad [20].

Se pronostica que la demanda mundial de energía para los siguientes 20 años alcanzará los 13,529 Mtpe (millones de toneladas de petróleo equivalente) [21], lo que indica que la degradación del medio ambiente es inevitable debido a la

generación de contaminantes y que el suministro y consumo de energía son claramente insostenibles. Para cumplir con la demanda, la producción de energía contempla el uso, en mayor proporción, de combustibles fósiles, los cuales emiten gases contaminantes como óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles, partículas y gases de efecto invernadero (principalmente bióxido de carbono (CO₂)). Ante este escenario la importancia del desarrollo energéticamente sustentable no se hace esperar y se deben tomar decisiones contundentes para mitigar la degradación del medio ambiente y la pobreza. Se deberán atender aspectos como la diversificación en el consumo y distribución de combustibles (principalmente petróleo) para ayudar a mejorar la seguridad energética; utilizando fuentes de energía renovable que reduce la necesidad de importación de combustibles, promover estrategias y mecanismos para eliminar barreras de mercado energético, proponer normas de eficiencia energética para los procesos de producción, implementar mecanismos de mercado para mejorar la competitividad y financiamiento de energías renovables, impulso a la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para el mejoramiento del uso de la energía, el acceso más amplio de servicios energéticos a precios asequibles, promover nuevas políticas gubernamentales para el sector transporte (uso de distintos combustibles y tecnologías), exigir a los países a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, promover el potencial tecnológico para oferta energética con cero emisiones de gases efecto invernadero, entre otras [22].

La UNCED ha fijado su atención explícitamente en la energía y ha determinado los principales problemas y las principales soluciones para lograr su sustentabilidad en los próximos años: el *acceso* más amplio a servicios de energía y con precios asequibles en una condición necesaria para hacer frente al desafío del objetivo del desarrollo del milenio de reducir a la mitad la proporción de personas que viven con menos de 1 dólar por día a más tardar en 2015; en *eficiencia energética*, las oportunidades se encuentran en casi todos los usos finales, sectores y servicios de la energía, y éste inmenso potencial todavía no se ha utilizado, por lo que las medidas encaminadas a incrementar el acceso de tecnología, la capacitación, el financiamiento, el estímulo al mercado y las cuestiones institucionales ayudarán a resolver el problema de éste rubro; la *energía renovable* tiene también un gran potencial para satisfacer necesidades básicas y facilitar el alivio de la pobreza y el desarrollo sustentable, ya que se tiene una amplia gama de tecnologías comercialmente disponibles y probadas, sin embargo, no se utilizan en la medida suficiente; *tecnologías avanzadas* de combustibles fósiles seguirán siendo la fuente de energía a nivel mundial, pero la importancia de utilizarlas en forma más eficiente y encontrar la forma de reducir sus efectos negativos sobre el medio ambiente en los planos local, regional y mundial, es una tarea incansable para apoyar el desarrollo sustentable; finalmente, la *energía y transporte* es el sector de mayor índice de consumo energético, siendo que la contaminación generada por la combustión de

combustibles tiene efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud del ser humano, de tal manera que, se deberá considerar el uso de combustibles más limpios y la incorporación de sistemas de transporte con tecnología más eficiente y limpia (uso del hidrógeno como vector energético en el sector transporte).

1.4 El Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL.

El Artículo 12 de Protocolo de Kioto define el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en los siguientes términos: *el propósito del MDL es ayudar a las Partes no incluidas en el Anexo I de la Convención Marco y en el Anexo B del Protocolo de Kioto, a lograr un desarrollo sustentable y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las partes incluidas en el Anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones.*

El MDL forma parte entre los denominados mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kioto. El propósito de los mecanismos es poner a disposición de las Partes del Protocolo de Kioto instrumentos de mercado que puedan facilitar el cumplimiento de los objetivos de reducción asumidos por los países del Anexo I, al proporcionar una disminución en los costos de su cumplimiento [23].¹⁴

A través del MDL, un país Anexo I que tiene compromisos cuantificados de reducción de sus emisiones de gases efecto invernadero, puede desarrollar proyectos que contribuyan a reducir las emisiones en países en desarrollo que no tienen objetivos en la reducción de estas emisiones [24]. Por la realización de estos proyectos, el país recibe una cantidad de reducciones certificadas igual a la cantidad de gases reducida por los mismos, pudiendo utilizar estos certificados a efectos de contabilizar el cumplimiento de sus objetivos. En este contexto, las Partes no Anexo I se benefician de una transferencia tecnológica mediante actividades de proyectos que tengan por resultado Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE), y que contribuyen a su desarrollo sustentable; asimismo, las Partes Anexo I pueden utilizar las RCE generadas en los proyectos MDL para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos de reducción de emisiones de gases efecto invernadero asumidos al ratificar el Protocolo de Kioto.

De forma general, en los siguientes párrafos se presentan algunos aspectos de los proyectos MDL, como son el ciclo del mismo y sus implicaciones económicas.

¹⁴ El fundamento ambiental de los mecanismos reside en el hecho de que el cambio climático es un problema de carácter global; por ello, el objetivo de la Convención y del Protocolo es alcanzar una reducción de los niveles globales de los gases efecto invernadero en la atmósfera, siendo indistinto el conseguir las reducciones en uno u otro país.

1.4.1 Ciclo de un Proyecto MDL.

Para que pueda llevarse a cabo un proyecto MDL es necesaria la intervención de varios actores con funciones claramente definidas, y debiendo cumplirse los denominados requisitos de elegibilidad. Pueden promover proyectos MDL las Partes incluidas en el Anexo B del Protocolo de Kioto y entidades privadas y/o públicas autorizadas por la Parte correspondiente y participando bajo su responsabilidad.

Un proyecto MDL se distingue por siete etapas, las cuales se presentan en la Figura 1.4.

El documento de proyecto (DDP) presenta su diseño, tanto en los aspectos técnicos como organizativos, y constituye la principal aportación a las etapas de validación y registro del proyecto MDL, y también a la verificación de la reducción de emisiones antropogénicas de gases efecto invernadero. En contexto, el DDP debe incluir: la descripción de la actividad de proyecto, la aplicación al proyecto de una metodología para la base de referencia aprobada por la Junta Ejecutiva (Executive Board , EB por sus siglas en inglés), la aplicación de una metodología de vigilancia del funcionamiento del proyecto aprobada por el EB, una estimación de las reducciones de emisiones de gases efecto invernadero por fuentes, las repercusiones ambientales, y las alegaciones de los interesados en el proyecto.

El DDP debe ser validado por una Entidad Operacional Designada (EOD) contratada por los participantes. Asimismo debe ser sometido a información pública local e internacional, y a la aprobación y registro por el EB. Para la fase de operación, el DDP establece un plan de vigilancia que permite a los participantes calcular periódicamente las reducciones de emisiones de gases efecto invernadero por las fuentes.

El registro es la aceptación oficial de un proyecto MDL por el EB a petición de la EOD que lo ha validado. Es una etapa imprescindible para las fases siguientes del ciclo: verificación, certificación y expedición de las reducciones certificadas de emisiones. Una vez que el proyecto fue registrado por el EB, los participantes pueden proceder a su implantación,¹⁵ y los participantes son responsables de la vigilancia de la actividad del proyecto en la fase operativa. Consecutivamente, la verificación es el examen periódico e independiente de las reducciones vigiladas de emisiones antropogénicas por fuentes de gases de efecto invernadero, y la certificación es la constancia otorgada por la EOD al alcanzarse las reducciones

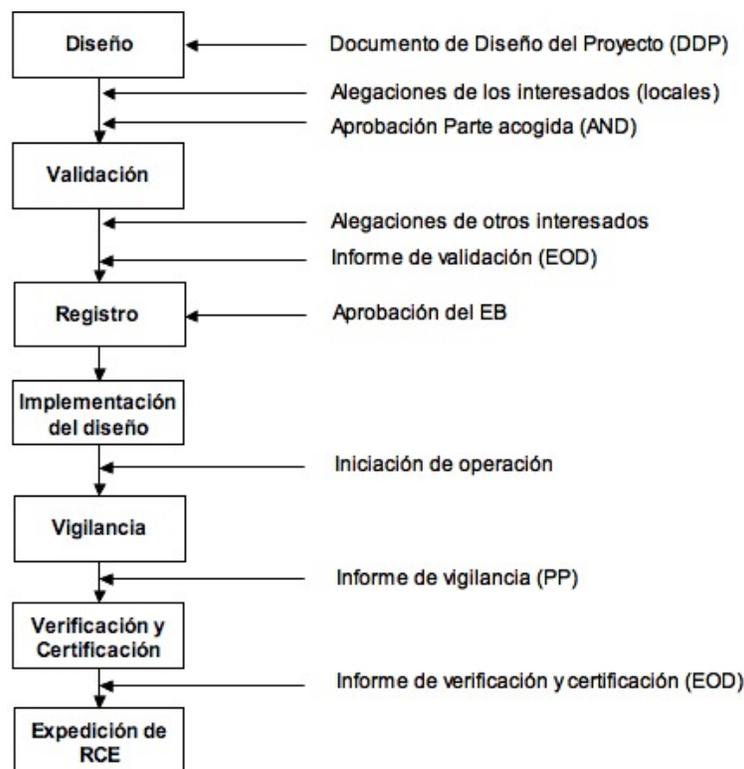
¹⁵ Exceptuándose los proyectos iniciados en el año 2000 y cuyo registro se haya solicitado antes del 31 de diciembre de 2005.

de emisiones antropogénicas por fuentes de gases de efecto invernadero, tal y como se habían verificado

Finalmente, el ciclo de un proyecto MDL concluye con el informe de certificación, que es en sí mismo una solicitud al EB de emisiones antropogénicas por fuentes de los gases de efecto invernadero. La expedición del RCE debe hacerse en un plazo de 15 días a partir de la recepción. En caso de una revisión, ésta se limita a cuestiones de fraude, incorrección o incompetencia de la EOD, y debe quedar concluida en un plazo de 30 días.

1.4.2 Los Costos de Transacción, Riesgos y Financiamiento de Proyectos MDL.

Para los proyectos MDL, el programa desarrolló el concepto de *costos de transacción* para intentar cuantificar los mismos. Por costos de transacción se entiende a todos los costos adicionales a los que normalmente incurre un proyecto normal (costos de capital y costos operativos), necesarios para cumplir con el ciclo de aprobación tal como MDL.



Fuente: Tomado del Programa Synergy, Guía Latinoamericana del MDL, Abril 2005.

Figura 1.4 Ciclo de un Proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

Existen varios factores que determinan la repercusión en el proyecto sobre los costos de transacción; son más o menos significativos y dependen del tamaño del proyecto, la utilización del personal local para los procesos de diseño, la implementación y vigilancia, el pago por adelantado o diferido de los costos de validación hasta que el proyecto esté operativo, la necesidad o no de que los certificados sean comercializados a través de un agente de negocios,¹⁶ entre otros.

Los costos de transacción no son directamente proporcionales al tamaño del proyecto. En este sentido, cuando el número de créditos generados es mayor, será menor la incidencia de los costos de transacción en los ingresos generados, y mayor motivación tendrá el inversionista en el desarrollo del MDL. Adicionalmente, las consideraciones sobre los costos asociados en varias etapas del ciclo de aprobación son: a) diseño conceptual, factibilidad y elaboración del proyecto, b) validación, verificación y certificación a cargo de la EOD y, c) gastos administrativos, registro de certificados y cargos por adaptación.¹⁷

Dentro de un proyecto MDL se aplican las técnicas de gestión de *riesgo*, las cuales deben ser ineludibles en este contexto. Considerando este aspecto, y la entrada en una etapa inicial de los proyectos MDL actualmente, se espera que una mayor experiencia y el desarrollo de la normatividad internacional conduzca a una mayor disponibilidad de información y de mejor calidad, que permita gestionar los riesgos más adecuadamente. Para ello, es apropiado tener en cuenta las siguientes consideraciones: a) a mayor riesgo deberá esperarse una mayor rentabilidad, b) trasladar riesgos a entidades mejor preparadas para asumirlos, c) transacciones entre empresas con perfiles de riesgo complementarios y, d) la cultura del riesgo en las organizaciones empresariales.

En correspondencia, los proyectos MDL requieren de un *financiamiento*, ya que las características de inversión son importantes; sobre todo en los proyectos MDL energéticos, los cuales comparten proyectos típicos de oferta de energía y de eficiencia energética. Para lograr esto, son necesarios los agentes y modelos de financiamiento, los cuales pueden ser los promotores locales que emprenden un proyecto MDL con el propósito explícito de generar y exportar RCE. Otras instancias que pueden actuar como agentes financieros son las empresas de países Anexo I que requieren créditos de carbono, las cuales pueden pactar con promotores locales con la aportación de capital de riesgo o concediendo préstamos al proyecto a cambio de recibir las RCE generados por el proyecto. Del mismo modo, los agentes pueden ser empresas u organismos externos (socios financieros) para las cuales los proyectos MDL constituyen una oportunidad de inversión por el rendimiento que puedan tener estos proyectos.

¹⁶ La participación de agentes de negocios es importante en el caso de tratarse de proyectos que generen certificados para ser vendidos en los mercados de carbono en países Anexo I.

¹⁷ En cuanto a los Cargos por Adaptación, estos los establecieron en el 2% sobre el valor de los Certificados de Carbono y se aplican en los países más vulnerables, es decir, los países considerados de menor desarrollo.

Finalmente, existen instituciones, fondos y programas para el financiamiento de los proyectos MDL. Su adecuación se basa en varios factores, como son: el tipo de tecnología transferida, los países de acogida y de inversión, los objetivos y el tamaño del proyecto, etc. Entre los grupos financieros más importantes se encuentran: Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Corporación Andina de Fomento (CAF), Fondos Hemisféricos de Energía y Transporte Sostenible (FHET), ESCO Fund (Fondo de Energía Limpia y Eficiencia Energética en ALCA), Fortalecimiento de la Capacidad para el Desarrollo de Energías Renovables en América Central (FOCER), Global Environment Fund (GEF), Fondos de Fideicomiso para apoyar el PNUD, Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), Banco Europeo de Inversiones (BEI) y, Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM).

Capítulo II

El Concepto de Exergia y su Método de Análisis

Este capítulo presenta el concepto de exergia con algunos toques de vida cotidiano. Se trata de explicar su concepto sin llegar a comprender complicadas ecuaciones matemáticas, por lo que su entendimiento se hace más amigable. Sin dejar su parte fundamental, se explica ampliamente el desarrollo termodinámico para llegar a su definición. Las ecuaciones presentadas son las ecuaciones básicas para comprender su concepto. Por su parte, la metodología de análisis del concepto de exergia fue tomada del desarrollo propuesto por Rivero [42], en donde se indica puntualmente el procedimiento del análisis de exergia para un sistema. Como parte de su divulgación, en la sección final se presentan algunas aplicaciones del método de análisis de exergia.

2.1 Surgimiento del Concepto de Exergía.

Con más de un siglo en la investigación de la energía y el establecimiento de la segunda ley de la termodinámica, científicos como Sadi Carnot (1796 - 1832) y Willard Gibbs aportaron los fundamentos teóricos para que se empezaran a desarrollar los conceptos del estudio del trabajo disponible en el flujo o masa, que hoy en día es conocido con el nombre de “exergía”.

En 1824 el científico francés Sadi Carnot publicó su trabajo en el que determinó la cantidad máxima de trabajo que puede ser obtenido de una fuente de calor,¹ y que hoy en día es conocido como la *exergía del calor* [25]. En 1843 el alemán Julius Meyer formuló el enunciado del primer principio de la termodinámica y para 1848 el inglés James Joule lo demostró experimentalmente. Ya en 1850 el científico alemán Rudolf Clausius (1822 - 1888) formalizó los enunciados de los dos principios de la termodinámica y define la función de entropía. Para 1875 los fundamentos teóricos del concepto de exergía fueron expuestos por Willard Gibbs en su libro titulado “On the equilibrium of heterogeneous substances”, pero no hasta 1889 cuando el francés George Gouy propuso el nombre de “Energie utilisable” (Energía utilizable) como una nueva función termodinámica para generalizar el hecho conocido de que solamente una fracción de la energía térmica puede ser convertida en energía mecánica. Nueve años después, en 1898 el alemán A. Stodola utilizó el término “freie technische energie” para hablar de exergía. Los trabajos de Gouy y Stodola, realizados independientemente, son ciertamente equivalentes. El primero se consagró en los sistemas cerrados y el segundo en los sistemas abiertos. Su principal aportación en el desarrollo de la exergía es la definición de la destrucción de exergía como el producto de la temperatura del medio ambiente y del cambio de entropía que conocemos hoy día como el teorema de Gouy-Stodola. Entre 1925 y 1932 los norteamericanos William DeBaufgre y Joseph Keenan, y los franceses G. Darrieus, G. Lerbergue y P. Glansdorf crean el término “available energy” (energía disponible) [26].

Los términos siguieron surgiendo, y en 1935 el croata Fran Bonjakovic publicó su libro “Engineering Thermodynamics” [27], en donde dedica un capítulo al término “Technische Arbeitsfähigkeit” (capacidad de trabajo técnico). Pero no hasta mediados del siglo pasado cuando los especialistas en el tema empiezan a proponer un término de aceptación mundial; es así cuando el alemán U. Grigull propone la palabra “Ektalpie” y que posteriormente fuera debatida por el científico yugoslavo Z. Rant (1904 - 1972) el cual establece la palabra “exergie” o *exergía*² como el término que debe emplearse, fundamentando su estructura con base en su significado etimológico [28].

¹ Libro publicado en francés con el nombre “Réflexions sur la puissance de feu et sur le machines propres à développer cette puissance”, Paris Bachelier, 1824.

² El término exergía proviene del griego *ex* = fuera y *erg* = trabajo

Hoy en día distintos investigadores en el área termodinámica se han encargado de extender su conocimiento y aplicación en todo el mundo a través de sus trabajos científicos y publicaciones en simposios y revistas internacionales. Por mencionar algunos, el polaco Jan Szargut ha publicado diversos artículos y libros en el tema del Análisis de Exergia [29,30,31]; el inglés Tadeus J. Kotas con su libro sobre el Método de Exergia en el Análisis de Plantas Térmicas [32]; los norteamericanos M. Tribus y R. Evans sobre el surgimiento de los análisis termoeconómicos [33]; el francés Pierre LeGoff[†] con el análisis exergético de procesos de destilación y bombas de calor [34,35]; el sueco Göran Wall con los análisis de exergia de distintas sociedades [36,37,38,39]; el norteamericano Michael Moran con diversos libros sobre termodinámica y su “availability analysis” [40,41]; el mexicano Ricardo Rivero y los análisis de exergia y exergoeconómicos de procesos de refinación de petróleo e industria petroquímica [42,43,44,45]; el brasileño Silvio de Oliveira Jr. en el estudio de sistemas de cogeneración y procesos de separación en plataformas marinas aplicando el análisis de exergia [46]; el italiano Enrico Sciubba y los análisis del ciclo de vida exérgico [47,48]; entre otros. En la Tabla 2.1 se listan los investigadores que en los últimos años han trabajado con el concepto de exergia.

La palabra “exergia” es usado mundialmente, y es la palabra que mejor se adapta para entender su concepto. Además, la palabra exergia forma parte de un grupo de palabras existentes y que están estrechamente relacionadas entre si, como son la entropía, anergia, entalpia, entrogia, etc. Adicionalmente, se puede distinguir que en esta tesis la palabra exergia no cuenta con el acento ortográfico; siendo puntualmente en el idioma español. En este caso, existe la disyuntiva de acentuar la palabra con acento prosódico (exergia) o acento ortográfico (exergía), pero el hecho es que no existe un antecedente previo desde su creación en 1956; singularmente, se tiene la falsa idea de que la palabra exergia es derivada de la palabra energía [28]. A esto, la palabra puede escribirse sin seguir una regla ortográfica, sin embargo es oportuno conocer el significado de su acentuación. La palabra se ha traducido en distintos idiomas, siendo los más conocidos como: exergie (en francés), essergia (en italiano), eksnergiva (en ruso), exergie (en holandés), exergia (en portugués), egzergia (en polaco), エクセルシ (en japonés: ekuseruji), exergie (en alemán), exergy (en inglés) y exergia (en español).

2.2 Definición de Exergia.

La exergia es un concepto termodinámico que surge de los trabajos de investigadores que estudiaron la transformación y las características de la energía. Su definición, aunque parezca difícil de comprender, no es más que una

proposición que expone las características del uso de la energía. Como se explicó en los párrafos anteriores, el uso de la exergía es cada día más usado para definir la calidad con la que se está disponiendo de la energía. En los siguientes párrafos se presentan los conceptos básicos de la termodinámica para posteriormente abordar con la definición termodinámica de exergía así como las formas que se representa.

<p>Alemania Baehr K. F. Knoche W. Fratzscher George Tsatsaronis</p> <p>Bélgica Philippe Mathieu</p> <p>Brasil Silvia Nebra Silvio De Oliveira Jr.</p> <p>Canadá Marc A. Rosen J. Kay Alain Legault</p> <p>España Antonio Valero</p> <p>Estados Unidos Adrian Bejan Yehia M. El-Sayed Elias P. Gyftopoulos D. A. Sama Richard Gaggioli Michael Moran Gordon M. Reistad M. V. Sussman R. B. Evans</p>	<p>M. Tribus Peter Salamon</p> <p>Francia Pierre LeGoff † Daniel Tondeur Michel Feidt J. P. Gourelia M. Gubert</p> <p>Grecia K. A. Antonopoulos Christos Frangopoulos D. A. Kouremenos</p> <p>Holanda Gerard Hirs Rene Cornelissen</p> <p>Israel G. Grossman</p> <p>Italia Enrico Sciubba Andrea Lazareto Alberto Mirandola</p> <p>Japón Masaru Ishida</p>	<p>México Ricardo Rivero</p> <p>Noruega Signe Klestrup Gelein De Koeijer Dick Bedaux</p> <p>Polonia Jan Szargut Andrzej Ziebiak Z. S. Kolenda</p> <p>Reino Unido Tadeus J. Kotas Colin Pritchard</p> <p>Rusia Victor Brodyanskii V. Yantovskii A. I. Kalina</p> <p>Suecia Göran Wall</p> <p>Suiza Daniel Favrat François Marechal</p> <p>Turquía Yelsin Gogus</p>
---	--	---

Tabla 2.1 Investigadores alrededor del mundo que aplican el concepto de exergía.

2.2.1 Conceptos básicos de la termodinámica.

El objetivo de esta sección es dar a conocer algunos conceptos básicos de la termodinámica, sin entrar a detalle en el desglose matemático de las ecuaciones.

La palabra termodinámica proviene del griego *therme* = calor y *dynamis* = fuerza. El estudio formal de la termodinámica comienza a principios del siglo XIX en consideración al concepto de energía del calor: la capacidad de los cuerpos

calientes para producir trabajo [49]. Ahora el alcance es considerablemente amplio, tratando generalmente con energía, sus transformaciones, y con relación entre las propiedades de las sustancias.

Las leyes de la termodinámica tratan con interacciones entre sistemas. Para una masa de control, estas interacciones pueden ser divididas en dos clases: interacciones de trabajo e interacciones de calor.

La *Primera Ley* establece que existe una propiedad termodinámica llamada energía interna (U), tal que un cambio en su valor es dado por un sistema en movimiento por la diferencia entre el calentamiento (Q) y el trabajo (W) hecho por el sistema durante un cambio de estado. En otras palabras, el cambio de energía interna de una sustancia en un proceso estable, es efectuado por la diferencia de calor y trabajo.

$$Q - W = \Delta U \quad (2.1)$$

donde:

$$\Delta U = U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 es conocida como la ecuación del balance de energía para un proceso en estado estable.

La energía asociada con masa tiene varias formas (evaluado con respecto al estado de referencia del sistema). Energía de masa en movimiento es llamada *energía cinética* ΔE_k , la energía de la posición de la masa es llamada *energía potencial* ΔE_p , y la energía asociada con el movimiento y configuración de las partículas internas de la masa es llamada *energía interna* ΔU . Estos tres términos constituyen entonces el cambio de la energía de un sistema, ΔE . De tal manera, la forma general del balance de energía es:

$$Q - W = \Delta E \quad (2.3)$$

donde:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (2.4)$$

Existen varias propiedades termodinámicas relacionadas con la energía interna que se definen debido a la utilidad que tienen en la aplicación de la termodinámica a los procesos prácticos. Una propiedad frecuentemente usada, y que relaciona a la energía interna u , presión p y volumen específico v , es la entalpía, la cual está definida como:

$$h = u + pv \quad (2.5)$$

o sobre una base extensiva como:

$$H = U + pv \quad (2.6)$$

Es habitual definir la entalpia total del sistema relacionado a la ecuación 2.4 y 2.6, considerando el estado de referencia "0", como:

$$H - H_0 = (U - U_0) + P_0(V - V_0) + \frac{1}{2} (v - v_0)^2 + g(z - z_0) \quad (2.7)$$

La primera ley trata con las cantidades de energía de varias formas transferida entre el sistema y los alrededores, y con los cambios en la energía almacenada en el sistema [50]. Esta consideración de trabajo e interacciones de calor como formas de energía en tránsito no ofrecen la indicación acerca de la posibilidad de un proceso espontáneo en una dirección certera. En consecuencia, la segunda ley de la termodinámica es requerida para establecer la diferencia de calidad entre la energía mecánica y la energía interna, así como indicar la dirección de los procesos espontáneos.

El postulado de la *Segunda Ley* establece que existe una propiedad termodinámica extensiva de un sistema llamada entropía (S), de tal manera que su valor nunca decrece en un sistema aislado.

$$(\Delta S)_{\text{aislado}} \geq 0 \quad (2.8)$$

donde el signo de igualdad corresponde al caso ideal de un proceso reversible.

Aunque parezca difícil de comprender, la entropía no es más que una medida del grado de desorden de cualquier sistema (por ejemplo: el universo).³ Sin embargo hay distintos tipos de sistemas que se caracterizan por conjuntos distintos de variables mensurables y con frecuencia en aplicaciones de ingeniería en las que se involucran la temperatura, el volumen, la presión y la composición [50]. Aplicando el postulado de la segunda ley en un análisis termodinámico de

³ Para comprender el concepto de entropía no es necesario estudiar detalladamente modelos matemáticos y conceptos que son a menudo difíciles de entender. Las investigaciones hechas por los científicos han sido extensas y aquí no es posible demostrarlos de manera puntual; pero sin duda se logrará comprender más este maravilloso concepto. Para muchos, la entropía es una medida del grado de desorden o una alteración del orden, sin embargo se debe entender inicialmente qué es el orden. Por ejemplo, si se tiene un frasco lleno de canicas de distintos colores, se puede observar que están ordenadas porque permanecen almacenadas en el recipiente; por el contrario otro observador puede determinar que se encuentran desordenadas porque no están clasificadas conforme a su color. Esto quiere decir que el concepto de orden es muy subjetivo: lo que puede ser orden para un grupo de personas, seguramente no lo es para el otro grupo. Si se aplican este tipo de criterios en el concepto de entropía para un sistema (cerrado), se obtiene que la entropía corresponde justamente a la medida cuantitativa del máximo desorden posible del sistema. Se vive totalmente en un ambiente de desorden (o entrópico) y es algo que no se puede detener. Si se lograra llegar a viejos y posteriormente vivir en cuenta regresiva, estaríamos en un proceso de vida reversible y eso jamás sucederá. En consecuencia, ¡ hay que disfrutar de la vida en el estado de entropía que uno se encuentre ¡.

un sistema macroscópico se requieren de evaluaciones cuantitativas de los cambios de entropía del sistema bajo consideración. Cuando el sistema consiste en una sustancia simple comprensible en un estado de equilibrio, algunas de las dos propiedades independientes puede ser utilizada para determinar una tercera propiedad; de aquí surge la ecuación de Gibbs que puede ser utilizada para calcular los cambios de entropía de una sustancia de composición invariable.

$$dU = T dS - P dV \quad (2.9)$$

o

$$dS = \frac{1}{T} dU + \frac{P}{T} dV \quad (2.10)$$

En el caso de sistemas cerrados de esta índole, el trabajo de un proceso reversible se calcula siempre partiendo de:

$$dW_{\text{rev}} = P dV \quad (2.11)$$

y de la forma diferencial de la ecuación 2.3, se tiene:

$$dQ_{\text{rev}} - P dV = dU \quad (2.12)$$

Comparando la ecuación 2.9 y la ecuación 2.12, se obtiene:

$$dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} \quad (2.13)$$

donde el subíndice “rev” indica que esta relación es aplicable sólo para un proceso reversible de transferencia de calor interno. La ecuación 2.13 es una alternativa de la definición de entropía.

En todos los procesos termodinámicos existen ineficiencias en la conversión de la energía, por lo que la eficiencia de una máquina térmica en operación cíclica entre dos fuentes de energía térmica es:

$$\eta \equiv \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (2.14)$$

para determinar la eficiencia máxima del ciclo, en la Figura 2.1 se representa una máquina térmica que opera entre una fuente de alta temperatura y una fuente de baja temperatura, en donde se libera trabajo hacia una fuente de energía mecánica [32]. La máquina térmica y las fuentes de temperatura y trabajo forman un sistema aislado para la cual, y acorde a la segunda ley, la entropía nunca

podrá disminuir. La expresión de cambios de entropía para el ciclo de las dos fuentes térmicas es:

$$\Delta S = - \frac{Q_{\text{entrada}}}{T_{\text{alta}}} \quad \text{y} \quad \Delta S = \frac{Q_{\text{salida}}}{T_{\text{baja}}} \quad (2.15)$$

Considerando que el cambio de entropía es cero en un proceso cíclico para la máquina térmica, entonces se obtiene:

$$\left(\frac{Q_{\text{salida}}}{T_{\text{baja}}} - \frac{Q_{\text{entrada}}}{T_{\text{alta}}} \right) \geq 0 \quad (2.16)$$

Entonces de la ecuación 2.3 se obtiene:

$$W_{\text{neto}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} \quad (2.17)$$

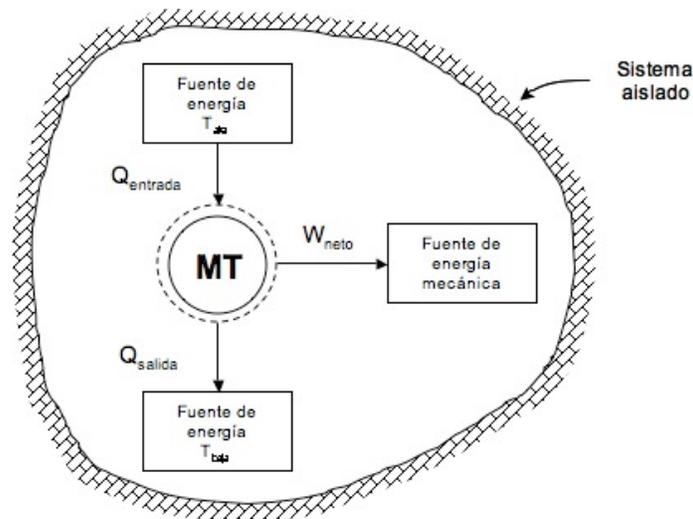


Figura 2.1 Máquina térmica (MT) operando entre dos fuentes de energía (T_{alta} y T_{baja}) y con liberación de trabajo (W_{neto}) a la fuente de energía mecánica.

Por lo tanto, la eficiencia de la máquina térmica será:

$$\eta = \frac{Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (2.18)$$

y considerada para un proceso reversible, entonces:

$$\eta_C = \frac{T_{\text{alta}} - T_{\text{baja}}}{T_{\text{alta}}} \quad \text{o} \quad \eta_C = 1 - \frac{T_{\text{baja}}}{T_{\text{alta}}} \quad (2.19)$$

la cual es comúnmente conocida como la *Eficiencia de Carnot*.

Las aplicaciones de la segunda ley son múltiples. La condición de incremento de entropía puede ser usado para predecir qué procesos, reacciones químicas, transformaciones entre varias formas de energía, o direcciones de transferencia de calor pueden y no pueden ocurrir. De la condición de un estado de equilibrio de un sistema aislado, dos partes del sistema corresponden a la entropía máxima; esto demuestra que las condiciones de equilibrio térmico, mecánico y químico corresponden respectivamente a la igualdad de temperatura, presión y potencial químico. En correspondencia, la segunda ley gobierna los límites de la conversión de energía entre diferentes formas de energía, principalmente para el concepto de su calidad o exergía.

2.2.2 La Exergía.

La energía se manifiesta por si misma en muchas formas, cada una con su propia característica y su calidad. Calidad de la energía es sinónimo de la capacidad para causar un cambio. La calidad de una forma dada de energía depende sobre su modo de almacenamiento. Esto puede ser de la forma ordenada⁴ o desordenada⁵ en la cual hay varios grados de alternancia [42].

En la literatura, el concepto de exergía se refiere al sugerido por el científico Z. Rant en 1953, donde expresa que la exergía “es la capacidad de trabajo técnico”, pero una definición completa ha sido presentada por Szargut [29]:

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.

Otros conceptos de la exergía han surgido, por lo que se debe centrar la atención en que la exergía es una parte de la energía que se degrada y que en realidad aprovechamos. Aunque la definición hecha por Szargut parezca un poco confusa, no se debe perder su esencia. La exergía se manifiesta en todas partes y vivimos con ella sin darnos cuenta. Desde el punto de vista termodinámico, la

⁴ Todas las moléculas portadoras de entalpía total o las partículas cargadas en el caso de la electricidad se desplazan de manera coherente sin sufrir transformaciones; se trata entonces de trabajo o una variación de energía cinética o energía potencial.

⁵ En un proceso desordenado todas las moléculas se desplazan en trayectorias incoherentes.

exergia es una propiedad extensiva, tal que en todo proceso real su calidad disminuye.

La energía de la materia está conformada por una que es útil y otra que no lo es; a esta manifestación de la energía se le conoce como exergia y anergia⁶, respectivamente [42].

$$E = E_x + A_n \quad (2.20)$$

Energía = Exergia + Anergia

En términos más coloquiales e ilustrativos, cuando se compra una manzana roja en el supermercado, se podría considerar que se encuentra en muy buen estado porque se le ve con un color rojo intenso, sin embargo, cuando se dispone a comerla en casa se podría identificar que una porción de la manzana está en mal estado (podrida) en el interior de ella. En consecuencia, y si fuera la última manzana para comer, se podría desechar la porción que se encuentre en mal estado y así comer lo que en realidad sirve. Esta es la manera de cómo la exergia (lo que se come) y la anergia (lo que no es útil) forman parte de la energía, por lo que de esta manera es como se manifiesta en cualquier sistema.

El cálculo de la exergia se basa en la determinación de dos funciones termodinámicas, que son la entalpía y la entropía. De esta manera, si un sistema se encuentra definido por sus variables independientes de temperatura, presión, composición y posición, y considerando cualquier medio ambiente de referencia "0", la exergia del sistema es definida por la expresión general [43]:

$$E_x = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \quad (2.21)$$

Esta ecuación general de exergia está formada por dos términos y una constante que están referenciados por las condiciones del medio ambiente. El primer término corresponde a la entalpía total (ΔH) y el segundo término a la entropía total (ΔS) del sistema. T_0 es una constante de proporcionalidad y está referida a las condiciones de referencia. La exergia no es una función de estado ya que es la combinación de dos funciones de estado que son la entalpía y la entropía, es decir, es una combinación de las dos leyes de la termodinámica (ecuaciones 2.3 y 2.13). La derivación termodinámica de la ecuación 2.21 se presenta en el Apéndice A de esta tesis.

La exergia tiene dos formas de manifestarse, y una es asociada sin una corriente de materia (función de transferencia) y la otra con una corriente de materia (función de estado).

La exergia como función de transferencia, asociada a la energía en tránsito, es descrita por la exergia del trabajo E_{x_w} y la exergia del calor E_{x_h} .

⁶ El término anergia creado por el científico Esloveno Zoran Rant (Sept. 14, 1904 – Feb. 12, 1972) parte del griego $a =$ sin y $erg =$ trabajo.

$$Ex_w = W \quad (2.22)$$

$$Ex_h = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.23)$$

Por otro lado, la exergia como función de estado, es descrita por la exergia de la materia Ex_m y esta a su vez puede estar dividida en distintos componentes. En la ausencia de efectos nucleares, magnetismo, electricidad y tensión superficial, la Ex_m es:

$$Ex_m = Ex_k + Ex_p + Ex_f + Ex_q \quad (2.24)$$

donde Ex_k es la exergia cinética, Ex_p la exergia potencial, Ex_f la exergia física y Ex_q la exergia química. Ex_k y Ex_p están asociadas con el alto grado de energía y es llamada como energía inercial, y Ex_f y Ex_q están asociadas con el bajo grado de energía y son llamadas como la exergia sustancial. La ecuación 2.22 también puede ser escrita en su forma específica, y está denotada como:

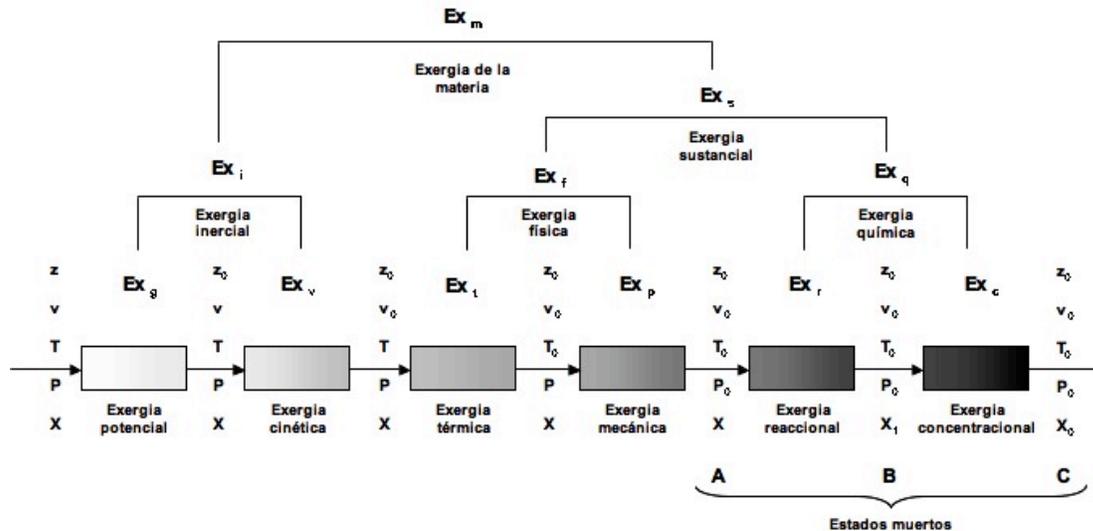
$$ex = ex_k + ex_p + ex_f + ex_q \quad (2.25)$$

siendo $ex = Ex / m$.

En la Figura 2.2 se presentan los componentes de la exergia de la materia y las condiciones a las cuales son calculadas para tres condiciones prácticas del estado muerto.⁷ Dichas condiciones son representadas por la posición z , velocidad v , temperatura T , presión P y composición X .

En suma, la exergia es una propiedad termodinámica que tiene un gran potencial para ser aplicada en casi todos los campos de estudio. Específicamente en el campo industrial, se pueden tener mayores beneficios al llevar a cabo análisis de segunda ley (exergia) en comparación a los análisis de primera ley (entalpía). Existe una metodología para llevar a cabo los análisis de exergia, la cual ha demostrado que su aplicación es efectiva para determinar los parámetros exergéticos de los procesos. Su aplicación facilita la toma de decisiones entre los aspectos energéticos-económicos-ecológicos.

⁷ El estado muerto termodinámico se define por el estado de equilibrio mecánico, térmico y químico entre el sistema y el medio ambiente cuando sus interacciones son satisfactorias. De esta manera, a presiones y temperaturas dadas, los potenciales químicos de las sustancias entre los sistemas y el medio ambiente deben ser iguales. Bajo estas condiciones el equilibrio termodinámico total entre el sistema y el medio ambiente, el sistema no puede sufrir algún cambio de estado a través de una forma de interacción con el medio ambiente.



FUENTE: Referencia [42].

Figura 2.2 Exergía de la materia.

2.3 El Método de Análisis de Exergía.

El análisis de exergía es una distinción de las manifestaciones en que la energía es degradada y que tiene como objetivo primordial encontrar los puntos críticos de un sistema donde es necesaria la aplicación de medidas para reducir el consumo de energía y hacer su utilización de manera más económica y eficiente.

Actualmente en la literatura se pueden identificar un sin número de procesos que han sido evaluados por medio del análisis de exergía, sin embargo cada uno de ellos han seguido sus propias metodologías de análisis. En contraste, en esta tesis se presenta la metodología desarrollada por R. Rivero [42,43] para identificar los parámetros exérgicos de los procesos.

Inicialmente, para aplicar un análisis de exergía a un sistema es necesario delimitarlo. Se debe considerar al sistema como un bloque, y éste método es conocido como “el método de bloques”. No existe restricción alguna para asignar el tamaño de un bloque. El bloque puede ser desde un complejo petroquímico, una refinería, un sector, o un país. Por ejemplo, para una refinería de petróleo, el bloque se puede considerar como toda la refinería o como sub-bloques (plantas de proceso, equipos, instrumentos, etc).

El bloque, siendo un sistema abierto, puede tener tres y sólo tres tipos de interacciones con sus alrededores, los cuales son: transferencia de masa,

transferencia de trabajo y transferencia de calor. En la Figura 2.3 se caracteriza un bloque con sus interacciones a la entrada y salida del mismo.

Al evaluar un bloque, no todo precisamente lo que entra es transformado en productos y servicios, ya que existen pérdidas de exergía causadas por las *irreversibilidades* (Irr) que se efectúan al interior del bloque y las que descargan al medio ambiente. De esta manera, cuando se cuantifica la diferencia entre la exergía total a la entrada y la exergía total a la salida del bloque, se obtienen las *pérdidas irreversibles de exergía*. Por lo tanto:

$$Irr = \sum EX_{\text{entrada}} - \sum EX_{\text{salida}} = EX_{tte} - EX_{tts} \quad (2.26)$$

Considerando la ecuación 2.21, se obtiene entonces:

$$Irr = \sum [(H - H_0) - T_0(S - S_0)]_{\text{entrada}} - \sum [(H - H_0) - T_0(S - S_0)]_{\text{salida}} \quad (2.27)$$

o

$$Irr = T_0 \Delta S \quad (2.28)$$

La ecuación 2.28 es conocida como el Teorema de Gouy-Stodola [51,52] o Ley de las Pérdidas de Exergía. En el Apéndice B de esta tesis se expone la derivación termodinámica del teorema.

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 EX_{nts} y la exergía neta producida EX_{ntp} :

$$Irr = \sum \Delta EX_{\text{fuentes}} - \sum \Delta EX_{\text{depósitos}} = EX_{nts} - EX_{ntp} \quad (2.29)$$

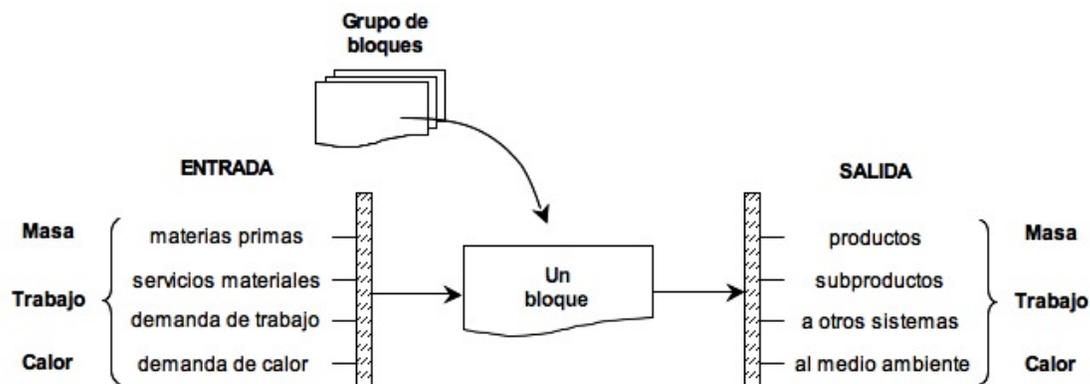


Figura 2.3 Método de bloques para el análisis de exergía.

Por otro lado, todas las corrientes que son desalojadas al medio ambiente son identificadas como los efluentes de exergía EX_{fl} , y se consideran así mismo como pérdidas de exergía. Los efluentes de exergía están determinados por:

$$EX_{fl} = \sum EX_{\text{desalojadas al medio ambiente}} \quad (2.30)$$

En consecuencia, las pérdidas totales de exergía serán la suma de las pérdidas por irreversibilidades y los efluentes totales:

$$P_{ex} = Irr + EX_{fl} \quad (2.31)$$

Adicionalmente, si se resta la exergía total de efluentes EX_{fl} a la exergía total a la salida EX_{tts} , se obtiene la exergía útil a la salida EX_{uts} , y está representada por:

$$EX_{uts} = EX_{tts} - EX_{fl} \quad (2.32)$$

De esta manera se obtiene el balance general de exergía, que a diferencia del balance general de energía (ecuación 2.3), aquí se cuantifican las pérdidas como irreversibilidades y efluentes totales, quedando de la siguiente manera:

$$EX_{tte} = EX_{uts} + Irr + EX_{fl} \quad (2.33)$$

Para cuantificar un sistema por medio un análisis de exergía es necesario hacer las evaluaciones con los parámetros antes descritos. No obstante, es necesario conocer cuál es la virtud para lograr el efecto deseado, qué tan real es el efecto logrado, y la relación entre el valor de la magnitud absorbida: eficiencia, efectividad y rendimiento, respectivamente.

La *eficiencia exérgica* es definida como la relación porcentual de la exergía total que sale del sistema y la exergía total que entra, pero también se expresa como la fracción de las pérdidas irreversibles de exergía:

$$\eta_{ex} = \frac{EX_{tts}}{EX_{tte}} = 1 - \frac{Irr}{EX_{tte}} \quad (2.34)$$

El segundo parámetro que se debe considerar es la *efectividad exérgica*, y es la que define qué tan real es el efecto que se está logrando. Es la relación de la exergía neta producida a la exergía neta suministrada:

$$\varepsilon = \frac{EX_{ntp}}{EX_{nts}} = 1 - \frac{Irr}{EX_{nts}} \quad (2.35)$$

La efectividad es entonces, la medida de la capacidad del sistema para producir el efecto deseado. Este es un parámetro muy importante por su concepto

termodinámico, lo que diferencia los análisis de primera ley a los de segunda ley. En un balance de entalpía nunca se determina la efectividad y se limita a evaluar qué tan efectivo es el sistema.

El tercer parámetro es el *rendimiento exérgico*, el cual se define como la relación entre la exergía de una magnitud cedida y la exergía de una magnitud absorbida, o la exergía útil a la salida y la exergía total a la entrada:

$$\zeta = \frac{Ex_{uts}}{Ex_{tte}} = 1 - \frac{Pex}{Ex_{tte}} \quad (2.36)$$

Adicionalmente, existe un tercer grupo de parámetros que combinan los dos grupos anteriores y se determinan como los parámetros combinados. Al relacionar las pérdidas de exergía y la efectividad se predice el funcionamiento de un sistema, por lo tanto esta relación es el *Potencial de Mejoramiento* [42]. Rivero presentó este parámetro para identificar a los bloques de un sistema que necesitan un determinado grado de optimización. Este parámetro está determinado por:

$$Pot = Irr(1 - \epsilon) + Ex_{fi} \quad (2.36)$$

El Potencial de Mejoramiento de un sistema es la medida de cuánto y cómo fácilmente el sistema podría mejorarse para propósitos de optimización. No sólo se vislumbra el aspecto energético, sino también incorpora los aspectos económicos y ecológicos. Para ello, existen metodologías específicas que relacionan dichos aspectos. Estos son los *análisis exergoeconómicos* y los *análisis exergoecológicos*, los cuales se describen en las siguientes secciones de este capítulo.

En consecuencia, y de acuerdo al desarrollo hecho por Rivero, el método general para aplicar un análisis de exergía a un sistema es el siguiente:

1. Para un sistema cualquiera, se debe presentar un diagrama en forma de bloques, tal que, se puedan identificar todas y cada una de las corrientes de entrada y salida del sistema. Estas corrientes pueden ser materias primas, servicios, productos, desechos (efluentes), calor, trabajo, electricidad, flujo efectivo, importaciones, exportaciones, etc.
2. Calcular los balances de materia, entalpía y entropía de cada bloque y en general, ya que a partir de ahí, se obtienen los balances de exergía. Es importante identificar que no será posible desarrollar un balance de exergía si no se cuenta con el balance de masa y el balance de entalpía cerrados.
3. Calcular los parámetros energéticos de cada bloque: irreversibilidades, exergía total de efluentes, exergía neta total suministrada, exergía neta total producida, eficiencia exérgica, efectividad energética, etc.

- Dependiendo de los objetivos del análisis, se podrán determinar los factores económicos y ecológicos del sistema.
4. Calcular el potencial de mejoramiento de cada bloque y el total del sistema.
 5. Identificar el bloque del sistema de presente el mayor grado de importancia para mejorarlo dependiendo del valor de su potencial de mejoramiento.
 6. Proponer medidas de optimización a los bloques con el mayor índice de importancia.
 7. Modificar el grado de agregación del análisis según sea el caso.
 8. Evaluar las propuestas de mejoramiento a partir de los aspectos energéticos, económicos, ecológicos y sociales. Estos pueden ser los ahorros de energía, los criterios de operación (en plantas industriales), la factibilidad de aplicación, los costos de inversión para el mejoramiento, el impacto hacia el medio ambiente, la disponibilidad de los recursos energéticos naturales, los factores sociales (educación, seguridad, salud, ingreso económico, etc.).

De esta manera es como se realiza un análisis de exergía de cualquier sistema. Como manera de ejemplo, en el Apéndice C de esta tesis se presenta el análisis de exergía de una caldera de vapor. Para este tipo de análisis, las herramientas de cálculo pueden ser muy diversas, desde hacer los cálculos de manera tradicional, hasta utilizar simuladores de procesos avanzados (por ejemplo, AspenPlus®) o diseñar programas propios.

2.4 El Análisis Exergoeconómico.

El análisis exergoeconómico es una metodología que combina los análisis de exergía y los principios de contabilidad económica para proponer el mejoramiento económico de los sistemas energéticos [45,53]. Asimismo, tiene el propósito de lograr, dentro un sistema dado, un balance entre el gasto sobre costos de capital y costos exérgicos los cuales darán un mínimo costo de la producción de la planta [54].

Comúnmente el termino usado que relaciona la exergía con la economía se le ha llamado Análisis Termoeconómico. Sin embargo hoy en día, es mejor aplicado el término de Análisis Exergoeconómico ya que especifica puntualmente el vínculo entre exergía-economía. Termoeconómico se podría entender para una aplicación más general, es decir, que involucre por separado los análisis de primera y segunda ley termodinámicas relacionados con los aspectos económicos.

Las metodologías desarrolladas hasta ahora se pueden clasificar en dos grupos. El primer grupo se refiere a la optimización del diseño y/o la operación del sistema energético analizado (optimización exergoeconómica), y el segundo grupo se refiere a la asignación de costos directos a sus flujos internos y productos (contabilidad exergoeconómica).

Un método desarrollado por Rivero [42], consiste en asignar los costos de las corrientes por unidad de exergia C_i (combustibles, servicios, productos, efluentes, etc.), esto es:

$$\Sigma (C_i EX_i)_{\text{entrada}} + Z_i = \Sigma (C_i EX_i)_{\text{salida}} \quad (2.38)$$

donde Z_i es el flujo monetario normalizado y anualizado con el capital, e involucra el factor de recuperación de capital $[A/P]$, el tiempo de operación del proceso t_{op} y el costo capital F_i .

$$Z_i = \frac{[A/P]}{t_{op}} F_i \quad (2.39)$$

y

$$[A/P] = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2.40)$$

Al realizar las ecuaciones del balance exergoeconómico de un sistema, generalmente se desarrollan un número superior "m" de incógnitas que número "n" de ecuaciones, por lo que hay que establecer ecuaciones adicionales para la solución lineal. Otro método para solucionar la complejidad del sistema de ecuaciones es por medio del método de costos promedio [45].

Aquí no se presenta una metodología para el análisis exergoeconómico, ya que rebasa los objetivos establecidos de esta tesis.

2.5 El Análisis Exergoecológico.

Siendo la exergia una propiedad termodinámica que considera las condiciones del medio ambiente como un estado de referencia, es muy importante establecer parámetros que permitan identificar los impactos que se producen sobre él. El impacto será mayor si el alejamiento de la exergia aumenta con su estado de referencia, es decir, si un efluente como los gases de efecto

invernadero se encuentran con un alto valor de exergia, entonces se tendrá un impacto considerable al entorno ecológico por estar en desequilibrio con el medio ambiente. Ahora bien, no se debe considerar a cualquier medio ambiente como la referencia termodinámica para las consideraciones ecológicas, ya que siempre se contarán con ambientes degradados por la contaminación; es recomendable establecer un estado de referencia del medio ambiente “sano”.

Los efluentes de exergia tienen que ver con el desequilibrio ecológico, y es una variable del potencial de mejoramiento que identifica la cantidad de desechos que son desalojados al medio ambiente de forma térmica, mecánica y química; esto desde el punto de vista de la tecnología empleada en los procesos industriales.

Los productos materiales de desecho han sido expresados por Reistad en 1970, en el cual incluye un factor de contaminación (FP):

$$PP = \sum m_{flj} FP_j \quad (2.41)$$

donde

$$FP_j = (\lambda_{c_j} \lambda_{v_j} \lambda_{a_j}) \quad (2.42)$$

λ_{c_j} λ_{v_j} λ_{a_j} son los coeficientes de contaminación del contaminante j y m_{fl} es su residuo material.

Es entonces a partir de este concepto que Rivero en 1993 define, junto con el potencial de mejoramiento, el concepto del *Potencial de Mejoramiento Exergoecológico* [42,55], el cual está presentado como:

$$Pot_{ec\ n} = Pot + \sum_{j=1}^n Ex_{flj} FP_j \quad (2.43)$$

donde el factor Ex_{flj} es la exergia total del material contaminante j .

La ecuación 2.43 puede ser escrita considerando la ecuación 2.36, quedando entonces:

$$Pot_{ec\ n} = Irr(1 - \varepsilon) + Ex_{fl} + \sum_{j=1}^n Ex_{flj} FP_j \quad (2.44)$$

Adicionalmente, y por razones prácticas, las pérdidas totales efluentes de exergia Ex_{fl} se dividen en dos términos: los desechos materiales Ex_{flj} y los desechos no-materiales Ex_{flk} . Por lo tanto, la ecuación 2.44 queda como:

$$\text{Pot}_{ec\ n} = \text{Irr}(1 - \varepsilon) + \sum_{k=1}^n \text{Ex}_{flk} + \sum_{j=1}^n \text{Ex}_{flj}(1 + \text{FP}_j) \quad (2.45)$$

En consecuencia, el análisis exergoecológico es un método útil que identifica cuánto y cómo podemos mejorar los procesos para disminuir la degradación del medio ambiente.

Este tipo de análisis se puede considerar como una herramienta valiosa para determinar si un sistema energético (por ejemplo una refinería de petróleo) es sustentable energética y ecológicamente. Como se indica en el Capítulo I, la sustentabilidad energética tiene que ver con la manera en cómo son utilizados los recursos energéticos y la forma en que éstos son aprovechados dependiendo de la tecnología implementada para tal efecto, así como el impacto que se causa al medio ambiente por su explotación y conversión. Es aquí donde los análisis exergoecológicos podrían contribuir al desarrollo de nuevos indicadores de sustentabilidad energética (o exérgica).

2.6 Algunas Aplicaciones del Análisis de Exergía.

Aquí se presentan algunas aplicaciones del análisis de exergía en sistemas energéticos, los cuales fueron realizados por diversos investigadores; específicamente en los procesos de refinación de petróleo, los procesos petroquímicos, así como en algunas sociedades del mundo.

Los análisis de exergía se han aplicado ya a un sin número de procesos energéticos, y la industria de la refinación del petróleo no es la excepción [44]. En la literatura se encontró que México es el país con un mayor índice de experiencia en esta área [56-62], sin embargo, la entrada en vigor de dichos análisis en su propia industria han sido limitados. En este contexto, una aplicación del análisis de exergía es la propuesta de la instalación de sistemas energéticos avanzado como es el caso de la destilación diabática [42,61,115] en la industria petrolera. Estos análisis han demostrado que las reducciones en el consumo energético son sostenibles y con grandes beneficios energéticos-económicos-ecológicos. Para citar un caso, los beneficios económicos por la construcción de una torre diabática para la estabilización de naftas corresponderían arriba de 9 millones de dólares (Musd) anuales [116]. Pemex tiene un gran potencial de diabatizar un número considerable de torres, sin embargo, actualmente no existe la visión política energética de largo plazo en crear o impulsar el desarrollo de proyectos para la instalación de esta tecnología.

Los actores políticos para la toma de decisiones⁸ se encuentran en un estado de miopes constante por su incapacidad de otorgar a México la oportunidad de contar con el desarrollo tecnológico propio de la destilación diabática. Otros países han estado investigando las oportunidades de instalar la tecnología de destilación diabática en su industria petrolera, los cuales cuentan con el apoyo económico sostenible (gubernamental y privado) para convertirse en desarrolladores de tecnología líder en el área de la destilación diabática. En suma, México, específicamente Pemex, tiene hasta hoy la oportunidad de ser líder en desarrollo tecnológico de la destilación diabática, sin embargo, deberá tomar decisiones verdaderamente racionales para evitar lamentaciones futuras.

Por otro lado, el análisis de exergía también ha sido aplicado en los procesos de generación energética como son los sistemas de cogeneración. Aquí, su aplicación involucra los aspectos exergéticos y económicos (exergoeconómicos) de dichos procesos [63-66], por lo que se identifican los costos exérgicos de cada una de las corrientes de los procesos. Estas investigaciones han demostrado que los costos por las pérdidas efluentes de exergía modifican el costo final de los productos, es decir, los efluentes con una gran cantidad de exergía deben ser aprovechados o agotados para aportar mayor beneficio económico a los productos finales.

Por último, los análisis de exergía también se han aplicado a sistemas de gran escala. Investigaciones como las de Wall [36-39,67,68], Eartsvag [69,70], Rosen [71], Hammond [72], Iler [73], Shaeffer [74], han determinado la eficiencia exergética de distintas sociedades en todo el mundo. Países como Suecia, Noruega, Canadá, Brasil y Estados Unidos presentan una eficiencia exérgica por arriba del 20%. Asimismo, países como Italia, Japón, Turquía y Finlandia presentan eficiencias exérgicas entre el 13 y 19%. Eartsvag, en su artículo sobre el análisis de exergía de distintas sociedades [70], ha presentado resultados de la eficiencia exérgica de países miembros y no miembros de la OCDE, además de presentar un estimado de la eficiencia exérgica a nivel mundial. En este contexto, los países miembros de la OCDE presentaron una eficiencia exérgica del 12% para el año de 1990, mientras que para los no miembros fue de 9%. Adicionalmente, según Eartsvag, la eficiencia exérgica a nivel mundial es del 10% para ese mismo año. Estos resultados demuestran que los países analizados tienen pérdidas de exergía muy elevadas, por lo tanto, no son sustentables energéticamente; es decir, que los procesos industriales de transformación, las políticas energéticas, los modelos económicos del sector energético, los programas ambientales y las actividades sociales no son los más adecuados para contribuir hacia los objetivos del desarrollo sustentable. Un país será cada vez más sustentable energéticamente cuando reduzca incrementalmente sus pérdidas de exergía.

⁸ Es el caso de Directores y Gerentes del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Capítulo III

Vinculo entre Exergia y Desarrollo Sustentable.

En este tercer capítulo se presenta el vinculo del concepto de exergia y el desarrollo sustentable por medio de distintas metodologías propuestas y desarrolladas por otros investigadores. Al inicio del capítulo se dan las generalidades de dicho vínculo. Posteriormente se aborda con la presentación de distintos conceptos que relacionan idealmente el concepto de exergia y desarrollo sustentable; herramientas de análisis como el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), el Análisis del Ciclo de Vida Exérgico (ELCA) y Análisis de Exergia del Ciclo de Vida (LCEA) son estudiados. Finalmente, se presenta el Modelo de las Cuatro E's (4E's), el cual contempla la adición del aspecto social en el modelo predecesor (Modelo de las Tres E's - 3E's) el cual es la Educación.

3.1 Generalidades.

Aun cuando el concepto de sustentabilidad sea cada vez más conocido y empleado, pasando a ser casi obligatorio referirse a él en las propuestas de cambio y desarrollo de todo y cualquier sistema, en verdad no parece que se haya logrado avanzar mucho en la cuantificación del mismo, es decir, en la medición de cuánto un determinado proceso o un sistema es, en términos absolutos o relativos, sustentable. Comúnmente la sustentabilidad se asocia con los términos ecológicos y energéticos, sin embargo esta tiene mayores implicaciones.

La sustentabilidad es un concepto muy general que abarca desde la observación de cualquier sistema, hasta la puesta en marcha de las tareas para el mejoramiento y calidad de vida del ser humano y del medio ambiente. Como se estudió en el Capítulo I, el desarrollo se definió como algo que se debe activar para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus necesidades. Pero la cuestión es: ¿cómo lograr que las futuras generaciones cuenten con los recursos necesarios para vivir?. Para dar respuesta, aquí se presentan diversos métodos de cuantificación para lograr la sustentabilidad de los procesos pero desde el punto de vista del análisis de exergía.

Existen diversos indicadores que se han propuestos, y en algunos casos con razonable difusión [75], como pueden ser los relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo la sustentabilidad sigue siendo más un adjetivo que un sustantivo. Es importante la cuantificación de la sustentabilidad, y esto resulta difícil debido a las relaciones que existen entre los factores energéticos, económicos, ecológicos y sociales; siendo este último el más complejo. Para ello, diversas organizaciones internacionales han desarrollado modelos para su cuantificación, llamándolos *indicadores de sustentabilidad*, los cuales se dividen en diferentes grupos. Así, son indicadores de sustentabilidad las emisiones de contaminantes atmosféricos, el nivel de uso de recursos fósiles, el impacto de la generación de empleo, la viabilidad financiera, la contribución al ahorro de divisas, entre muchos otros.

En contraste, los indicadores actuales no son parámetros que aseguren una vida sustentable, es decir, no se debe conformar con saber cuál es la cantidad de emisiones contaminantes al aire [76], o identificar el valor de la deforestación. Estos indicadores son sólo una estadística del comportamiento y no son un parámetro de mejoramiento sostenido. Para ello, un parámetro aún poco utilizado en estudios de sustentabilidad, y en particular para las consideraciones energéticas y ecológicas, es el análisis de exergía.

La cuantificación de la sustentabilidad por medio de los análisis de exergía, es una metodología propuesta por diversos investigadores para identificar y dar solución a los problemas energéticos y ecológicos por medio de la cuantificación de la irreversibilidad de los procesos. Entre las metodologías se encuentran los Análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Analysis, LCA), el Análisis del Ciclo de Vida Exérgico (Exergetic Life Cycle Analysis, ELCA), el Análisis de Exergía del Ciclo de Vida (Life Cycle Exergy Analysis, LCEA) y el Modelo de las Cuatro E's (4E's), los cuales son presentados en los siguientes párrafos.

3.2 Análisis del Ciclo de Vida - LCA.

El Análisis del Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta para analizar el daño medioambiental en la generación de productos. Contempla el estudio detallado de dicho daño en cada etapa del proceso de producción, en el cual contempla la extracción de recursos, producción de materiales, partes del producto y el producto en sí mismo, uso del producto, y administración después del desecho, re-uso, reciclado o disposición final.

En la última década, filiales de los Estado Unidos y Europa de la Sociedad Medioambiental de Toxicología y Química (SETAC por sus siglas en inglés)¹ ha dejado un desarrollo intenso de las metodologías del LCA [77], produciendo un "Código de Práctica", la cual ha sido la primera estructura técnica aceptada internacionalmente. Este trabajo de SETAC es la base para el protocolo del LCA en el estándar de administración medioambiental de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO por sus siglas en inglés), siendo identificada como ISO 14000. SETAC define las características inherentes del LCA como siguen:

- Un amplio sistema o perspectiva "sano o grave", implementando la cobertura de las operaciones múltiples y actividades a través de un ciclo de vida;
- Una perspectiva multimedia, implementando la cobertura del uso de recursos y emisiones a diferente medio ambiente (aire, agua y suelo), y;
- Un sistema funcional de unidad contable para normalizar las fuentes de energía, recursos materiales, emisiones, y desechos cruzados del sistema.

¹ SETAC es una sociedad mundial profesional, fundada en 1979 para proveer un forum de instituciones comprometidas en el estudio de los problemas medioambientales, la administración y la regulación de los recursos naturales, educación, investigación y desarrollo, y manufactura y distribución.

La metodología aceptada mundialmente para el LCA actualmente reconoce cuatro componentes (ver Figura 3.1). El primer paso es una *definición y alcance de las metas* para que se definan los objetivos específicos y los productos esperados de un estudio dado, además de identificar el tiempo y espacio, condiciones y factores del espacio, e impacto y objetivos de mejoramiento. El segundo paso es el *análisis de inventario*, el cual identifica y cataloga el uso de los materiales, energía y efluentes medioambientales de todas las etapas en la vida de un producto o proceso, El tercer paso es el *análisis de impacto*, en donde se examina el potencial y el actual estado del medioambiente, salud humana, y los efectos en la degradación de los recursos naturales (materia y energía). El cuarto y último paso (el cual es opcional), es un *análisis de mejoramiento* para conciliar cambios necesarios en la administración del medio ambiente, salud humana y recursos en los productos y procesos.

La primera consideración para el desarrollo de una estrategia del LCA es formular la propuesta de análisis. Para ello, diversos usos pueden ser contemplados en el LCA para: a) determinar los impactos de distintas formas de producir un producto; b) determinar los impactos de diferentes productos; c) determinar todos los impactos de un sector de la economía, tal como el sector energético; d) determinar todos los impactos del sistema social global y sus actividades.

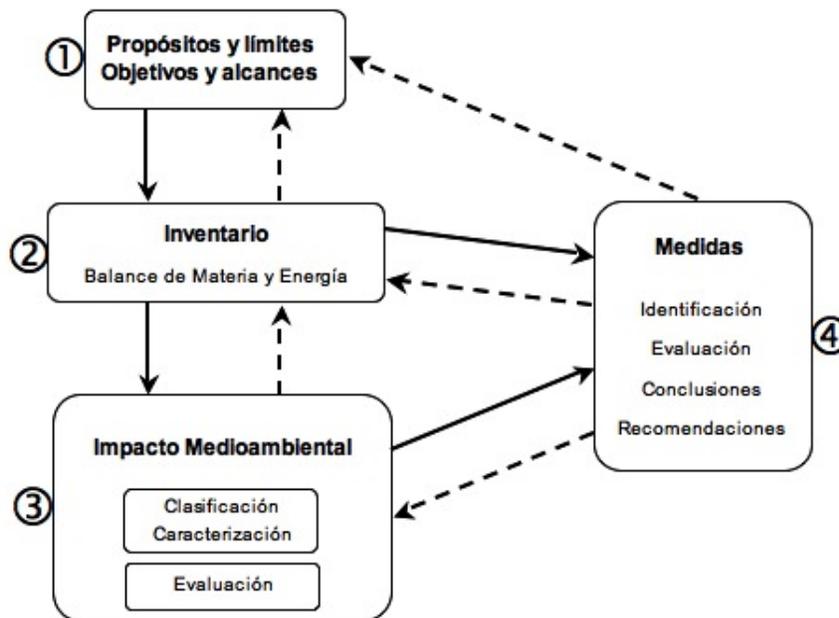


Figura 3.1 Los cuatro principales pasos de un LCA.

Por ejemplo, si se aplicara un LCA en el sector petrolero, se debería conformar por medio la opción (c). El curso de la investigación podría emplear diferentes tipos de análisis, como son:

1. Análisis de cadena (con cadenas distintas).
2. Nivel de análisis del sistema (cada dispositivo tratado por separado).
3. Análisis parcial del sistema (confinado para el sector energético).

En un análisis de cadena (1), los impactos causados por el lado de la cadena de entrada (ver Figura 3.2) son asignados a la cadena investigada por la fracción de producción entrante a la cadena [78]. Por ejemplo, si el equipo usado en un paso de la cadena tal como en una refinería de petróleo es proporcionado por un fabricante, el cual vende 20% de su producto hacia la refinería, entonces 20% de cada uno de sus impactos (sea medioambiental y social) son asignados a la refinería.

En el caso de un análisis tipo (2), los impactos de cada mecanismo en el sistema es calculado por separado y adicionado al final. Por ejemplo, los impactos directos en el proceso de refinación de petróleo son calculados, y los impactos directos de la manufactura de equipos de la misma manera; también algunas entradas pueden ser recibidas de otros actores. Hacia el final, sumando todo el cálculo de impactos proveerán en verdadero total sin una doble contabilidad.

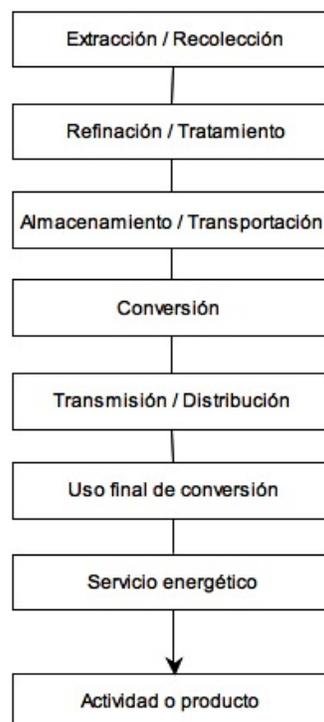


Figura 3.2 Cadena de conversión energética.

Para el caso de análisis tipo (3), se aplicaría un análisis parcial, en el cual, el sector energético sería tratado de forma directa, y otros sectores de la economía en forma indirecta. En el caso del sector energético, se deberían calcular los impactos individualmente por sí mismo, acorde al esquema de nivel (2) , mientras las entradas de equipos de otros sectores serían evaluados como productos, pero sin sus impactos adjudicados de otros actores.

En este apartado, la metodología LCA desarrollada por SETAC no incorpora los análisis de exergia, sin embargo, investigaciones como las de Szargut, Cornelissen y Wall asumen la importancia de la exergia para expresar en otro orden de ideas el concepto del desarrollo sustentable.

3.3 Análisis del Ciclo de Vida Exérgico (ELCA).

Para desarrollar este tipo de análisis, es necesario haber comprendido el concepto de exergia, el cual se presenta en el Capítulo II de esta tesis.

La ventaja de desarrollar un análisis de exergia en los procesos, impera en el hecho de identificar dónde ocurre el efecto deseado por medio de la minimización de las pérdidas de exergia. Es decir, indica la fracción de la energía que realmente puede ser utilizada. Este tipo de análisis aplicados en los sectores productivos pueden conducir al entendimiento de cómo mejorar la sustentabilidad de las actividades por la reducción del consumo de exergia.

El primer paso que se dio sobre el LCA con la aplicación de análisis de exergia fue hecha por el científico polaco Jan Szargut, el cual definió el concepto del Consumo Exérgico Acumulativo (Cumulative Exergy Consumption, CExC), que es el uso de exergia acumulada desde la extracción de recursos naturales hacia el producto final [79]. Para tal efecto, el CExC solamente considera la producción y el uso del producto o material dentro la contabilidad del proceso. El consumo de exergia es acumulada para un punto definido en el ciclo de vida, en consecuencia, en este método la destrucción de exergia asociada con el desecho del producto y la influencia de reciclado, los cuales causan cambios en la destrucción de exergia, no son considerados dentro la contabilidad.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la SETAC hoy en día no incorpora los análisis de exergia en los LCA, sin embargo existen ya metodologías que involucran, en conjunto, los LCA con los análisis de exergia.

La relación entre el LCA y el análisis de exergia está determinado por el concepto del Análisis del Ciclo de Vida Exérgico (Exergetic Life Cycle Analysis, ELCA). La

estructura del ELCA es relativamente la misma a la que presenta el LCA, la diferencia es que el análisis de inventarios es más extenso [80,81], los balances de materia y energía deben estar cerrados (que no siempre es el caso para el LCA), y las cajas negras deben ser más simplificados para que las entradas y salidas de los procesos de producción sean tomadas en cuenta dentro del inventario. Para el cálculo de exergía, las condiciones y composición del medio ambiente tienen que ser especificados.² El LCA limita la evaluación del análisis de exergía, por lo tanto, los impactos están limitados al cálculo de los flujos de exergía y la destrucción de exergía en diferentes procesos. Aquí, al realizarse la evaluación del ciclo de vida de un producto, se conoce el ciclo de vida irreversible de éste mismo, es decir, el análisis de mejoramiento es la minimización del ciclo de vida irreversible.

En el caso de la producción de co-productos, procesamiento combinado de desechos, y reciclado abierto, un método de asignación tiene que ser utilizado. Para ello, se sugieren los tres siguientes métodos:

- 1) Distribución de la destrucción de exergía sobre la base de los flujos de exergía.
- 2) Distribución de la destrucción de exergía sobre la base de la destrucción de exergía en el caso de producción separada de cada producto o manejo de cada desecho como fue sugerido por Szargut [79].
- 3) Método de costo marginal, el cual es la distribución de la destrucción de exergía sobre la base de los cambios en los flujos del valor de exergía.

El análisis de exergía señala con precisión los lugares donde la destrucción de exergía toma lugar y en el análisis de mejoramiento pueden ser presentadas diferentes posibilidades para minimizar la irreversibilidad del ciclo de vida. Los análisis de mejoramiento pueden ser expresados con un análisis exergoeconómico o un análisis exergoecológico.

3.4 Análisis de Exergía del Ciclo de Vida (LCEA).

El mejoramiento sustentable de los procesos o actividades se presenta por la minimización de las irreversibilidades en el ciclo de vida de los mismos; esto corresponde al ELCA arriba mencionado. Sin embargo, en un método similar, Gong M. y G. Wall [68] presentaron una clara distinción entre recursos renovables y no-renovables para evaluar la sustentabilidad de un proceso o

² Para procesos donde la locación no está especificada, es recomendado el uso del estado estándar de referencia establecido por Szargut [79].

actividad. Este método tiene sus raíces en 1977 con el trabajo presentado por Wall [82], y puede ser observado como una aplicación de la exergía a un LCA, el cual es referido como el Análisis de Exergía del Ciclo de Vida (Life Cycle Exergy Analysis, LCEA).

En el LCEA, los recursos físicos son clasificados dentro de los flujos naturales de exergía, fuentes de exergía y depósitos de exergía. Los flujos naturales de exergía y el uso sustentable de las fuentes de exergía establecen los recursos renovables. Un uso no sustentable de las fuentes de exergía pueden ser: el claro descuido de los bosques y los depósitos de exergía constituidos a los recursos no renovables. Este tipo de análisis es útil para desarrollar un sistema de abastecimiento energético sustentable en las sociedades.

Por ejemplo, las etapas de construcción, mantenimiento durante la operación, y limpieza de los sistemas de cogeneración, son etapas análogas al estudio del ciclo de vida de los productos. Es decir, la exergía de entrada utilizada para la construcción, mantenimiento y limpieza se puede llamar como la *exergía indirecta* ($Ex_{indirecta}$) (ver Figura 3.3); ésta puede ser originada de ambas fuentes, sea renovable o no-renovable. Cuando la planta de cogeneración es puesta en operación, se liberan productos como electricidad (exergía del trabajo), gases de combustión, calor, y otras formas de energía. Esto permite observar dos aspectos: (1) la *exergía directa de entrada* (Ex_{ent}) en un depósito (una fuente no renovable como es un combustible fósil) y, (2) la exergía directa de entrada en un flujo natural (un recurso renovable como el viento). En el primer caso, el sistema no es sustentable, ya que se usa exergía que es originaria de un depósito no sustentable (agotable). En el segundo caso, la *exergía producida* (Ex_{pr}) es sustentable debido a que se usa un flujo compensado por la exergía indirecta a la entrada.

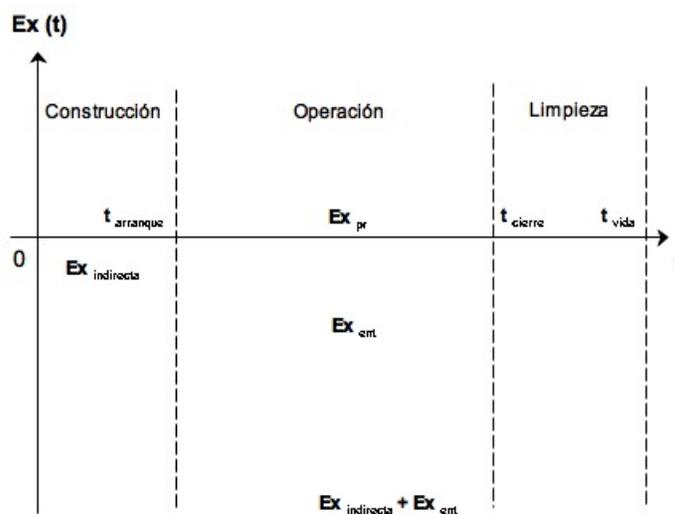


Figura 3.3 Uso de exergía durante el ciclo de vida de un sistema.

En el caso de aplicar un LCEA para el diseño de tecnología, puede resultar de gran utilidad para identificar si ésta es sustentable o no. Considérese el diseño de un panel solar para calentamiento de agua (de 60 a 70 °C), el cual está hecho de aluminio, vidrio y silicio, principalmente. En este caso, se requiere de una gran cantidad de exergía en forma de electricidad y procesos de alta temperatura (calentamiento) para la producción de aluminio, vidrio y silicio, y por lo tanto no es lógico derrochar tanta exergía en un producto el cual su periodo de recuperación sea todo el tiempo de uso de la misma, además de que el producto final contenga una exergía de bajo valor (agua caliente). Para llevar a cabo el calentamiento de agua con baja exergía, es preferible recurrir a otras fuentes de energía renovable o usar las existentes pero de forma directa. El desarrollo de un LCEA en este tipo de sistemas podría ser de gran ayuda para el diseño de los equipos.

3.5 El Modelo de las Cuatro E's.

El modelo de las Cuatro E's (4E's) surge de la importancia de incorporar el aspecto social en el modelo precedente llamado el modelo de las Tres E's (energía-economía-ecología). Aquí, una parte del aspecto social, como es la Educación, ha sido incorporado al modelo las Tres E's, dando como resultado la conexión entre la Energía, la Economía, la Ecología y la Educación.

El aspecto social juega un papel trascendente para llevar a cabo las políticas en el marco del desarrollo sustentable. Al hablar de desarrollo sustentable comúnmente se entiende por el desarrollo de programas para combatir la degradación del medio ambiente, sin embargo, tales programas deberán enfocarse en su conjunto entre los aspectos energéticos, económicos, ecológicos y sociales. Aquí, el aspecto social es muy complejo, ya que abarca distintos factores como son: la salud, la educación, la vivienda, los servicios, el desempleo, la seguridad, la infraestructura, etc. Aun cuando son muchos los factores sociales, aquí solamente se incorpora el factor de Educación para señalar el modelos de las Cuatro E's.

La relación entre energía-economía-ecología es un modelo que se ha discutido desde hace algunos años, cuando existió la preocupación de atender los problemas de carácter energético hacia el desarrollo de políticas sustentables [83]. En ese momento, los vínculos más fuertes se dieron entre energía-economía y energía-ecología. La primera relación (energía-economía) se dio a partir de la crisis energética de lo años 70's, la cual correspondió a la necesidad de considerar no sólo la cantidad de la energía cuando se desea optimizar su uso, sino también

la calidad de la misma; de aquí que los programas de ahorro de energía empezaran a tener efecto. La segunda relación (energía-ecología) se debió a la necesidad evidente de detener el deterioro ambiental originado por el consumo creciente de combustibles fósiles, a fin de garantizar la sustentabilidad medioambiental. Este modelo ha sido adoptado por la IEA como una guía de los principios de la política energética internacional, el cual se identifica como la relación entre Seguridad Energética - Protección Ecológica - Crecimiento Económico [84].

Como otra manera de referirse a “sustentabilidad”, aquí se ha incorporado a la Educación como una propuesta para identificar las posibles políticas entre las relaciones de las Cuatro E’s (energía-economía-ecología-educación). En la Figura 3.4 se presenta la relación de cada una de las Cuatro E’s, siendo el desarrollo sustentable (DS) la parte central en el cumplimiento de las mismas. Se observa que la Educación se presenta en cada una de las relaciones entre la energía, la economía y la ecología. Esto quiere decir que deberá existir un modelo educativo efectivo y sostenible en las políticas gubernamentales de cada país, de tal manera que garantice el uso adecuado de la energía, el crecimiento económico y el cuidado ecológico. Sin educación, un país no podrá ser sustentable en el largo plazo, por lo tanto ésta sí lograría un verdadero desarrollo sustentable.

Otra propuesta para analizar la relación de las Cuatro E’s es por medio de la evaluación de la calidad de la energía o exergía. La exergía podría ser una herramienta eficaz para determinar la sustentabilidad de cada una de estas relaciones. Como se presenta en el Capítulo II de esta tesis, el concepto de exergía puede aplicarse en los aspectos económicos y ecológicos, siendo estos específicamente como los análisis exergeconómicos y los análisis exergoecológicos. Adicionalmente, la educación ha sido identificada como el vínculo entre cada una de las relaciones (energía-economía; energía-ecología; economía-ecología), ya que la evaluación directa de la exergía en un aspecto social es aun no bien definido.³ En la Figura 3.5 se presentan cada una de las relaciones en función de la exergía.

El núcleo en los modelos de la Figura 3.5 está determinado por el concepto de exergía, lo que quiere decir que cada una de las relaciones estará regida por el término de calidad de la energía y vinculado a la educación.

³ En este contexto, el análisis de exergía no se ha aplicado directamente a un factor social, como lo es la educación, sin embargo sí se podría aplicar a otro factor social como es la salud humana. El ser humano es materia y energía, y éste puede ser analizado desde el punto de vista del análisis de exergía, en consecuencia, podríamos conocer la máxima cantidad de trabajo disponible del ser humano, sin distinción de raza, cultura y situación geográfica. Aunque el ser humano aquí la podríamos considerar como materia y energía, existen dos factores que no tiene medición exérgica, y están identificados como la “inteligencia humana” y los “sentimientos”.

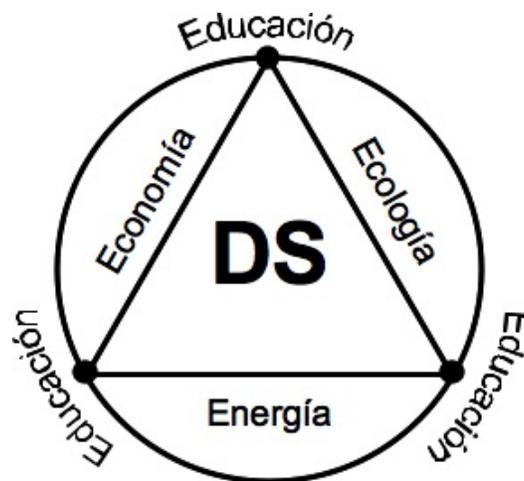


Figura 3.4 Modelo de las Cuatro E's (energía-economía-ecología-educación).

El modelo de la Figura 3.5 (a) determina la relación entre la exergía-energía y la exergía-economía, las cuales se dirigen en su conjunto hacia el aspecto de la educación. La relación energía-exergía está determinada por la metodología del análisis de exergía, en donde se identifica el comportamiento de los procesos industriales por medio de la obtención de los parámetro exérgicos presentados por Rivero [42] como son: las irreversibilidades, los efluentes de exergía, la eficiencia exérgica, la efectividad exérgica, el rendimiento exergético y el potencial de mejoramiento. La información obtenida de los parámetros exérgicos podrán implementar acciones inmediatas para el cuidado de los recursos exérgicos no renovables. Para lograr esto, la metodología del análisis de exergía debería ser dirigida al sector educación a determinado nivel, como son las universidades, los institutos de investigación, las direcciones de capacitación en las empresas del sector energético, los actores políticos, etc., como un camino para tener el conocimiento y las bases para llevar a cabo propuestas y proyectos de mejoramiento energético adecuados. Seguidamente, la relación exergía-economía está determinada por los análisis exergoeconómicos, los cuales representan la correcta evaluación de los costos energéticos en la producción de productos y co-productos, así como de los recursos exérgicos renovables y no renovables.⁴ Los análisis exergoeconómicos tienen una gran impacto para determinar el costo real de los productos, es decir, nosotros deberíamos pagar por la calidad de los productos, sin embargo, es algo que actualmente no sucede. Por ejemplo, si el costo de producción de la gasolina es analizado por medio de

⁴ El costo de los recursos exérgicos renovables y no renovables deberían ser implementados en el diseño de sistemas energéticos. Actualmente, en los análisis exergoeconómicos, el costo de los recursos renovables y no renovables (por ejemplo, aire y agua de ríos o mar, respectivamente) no se contemplan. Esta medida es inadecuada, ya que el usos de estos recursos en los sectores industriales son degradados, por lo tanto, se debería pagar por algo que se degrada y usar esos fondos para contribuir al mejoramiento del medio ambiente.

una evaluación exergoeconómica, seguramente se tendría un costo más bajo al que actualmente se tiene [62], debido a que el costo exergético de ésta misma no contempla la carga por irreversibilidades de los procesos para su producción. Una vez determinados los costos exergoeconómicos de los productos, se deberían hacer propuestas para el desarrollo de políticas energéticas adecuadas en la fijación de precios de los recursos exérgicos renovables y no renovables, entre ellos el petróleo, gas, condensados, productos refinados, petroquímicos, electricidad, agua, aire atmosférico, por mencionar algunos. En este contexto, la educación sería dirigida a los actores políticos, los cuales requieren del asesoramiento exergoeconómico para hacer propuestas realista y sin intereses particulares, y todo con el fin de cumplir realmente con los objetivos del desarrollo sustentable.

Similarmente, la Figura 3.5 (b) presenta la relación entre exergia-energía, la cual ya se ha explicado en párrafos anteriores. No obstante, se presenta la relación de exergia-ecología con el vínculo de la educación. La relación entre exergia-ecología está dada por el análisis exergoecológico, el cual determina el grado de mejoramiento ecológico en los procesos industriales. Aquí, el sano impacto ecológico es determinado por el potencial de mejoramiento ecológico propuesto por Rivero [42]. Al diagnosticar un sistema energético por medio de un análisis exergoecológico, se identifica el punto donde dicho sistema tiene mayor generación de contaminantes, lo que permitiría implementar medidas de optimización para el mejoramiento del uso de los recursos exergéticos.

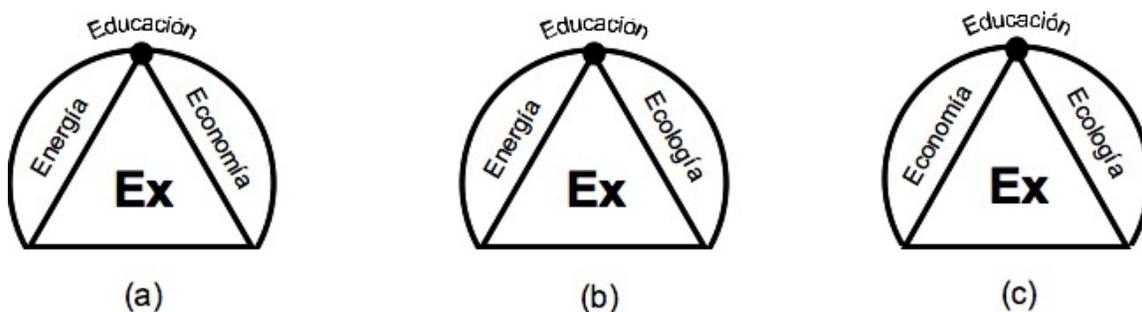


Figura 3.5 (a) Modelo energía-economía-educación, (b) Modelo energía-ecología-educación, (c) Modelo economía-ecología-educación.

Finalmente, la Figura 3.5 (c) presenta la relación entre exergia-economía y exergia-ecología, las cuales están determinadas por los análisis exergoeconómicos y análisis exergoecológicos de los procesos. Es decir, que se deberían contemplar en su conjunto dichos análisis para lograr un adecuado mejoramiento de la economía y la ecología del sector energético específicamente.

Aquí, el vínculo de la educación juega un papel importante, ya que el conocimiento de aspectos económicos muchas ocasiones se desliga de los aspectos ecológicos. Hoy en día, debería existir un área educativa que relacione estas dos disciplinas, llamándola como la *economoeología*, siempre y cuando esté sustentado por el concepto de exergia. La aplicación de los análisis exergoeconómicos y exergoecológicos en conjunto, podrían proponer nuevos mecanismos de desarrollo sustentable, tal como un nuevo mecanismo de desarrollo limpio (MDL) para el mejoramiento económico y ecológico sustentable del sector energético.

El modelo de las Cuatro E's podría representar el valor de cada uno de los países para afrontar los retos del desarrollo sustentable. No basta con simplemente hacer una propuesta, sino en realidad ejecutar las propuestas que sean viables, dejando a un lado los intereses personales, los cuales en muchas ocasiones se convierten en intereses nacionales.

Capítulo IV

Indicadores de Desarrollo Sustentable: el aspecto energético.

El Capítulo IV comprende el estudio de la cuantificación del desarrollo sustentable por medio de los indicadores de desarrollo sustentable que han propuesto diversos organismos de carácter internacional. Se presentan aquí los indicadores del aspecto energético, aunque se hace referencia a los aspectos económicos, medio ambientales y sociales. Indicadores desarrollados por las Naciones Unidas (UN), la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y OLADE/CEPAL/GTZ son presentados. Adicionalmente, se presentan los indicadores de sustentabilidad energética para México, los cuales fueron desarrollados por el Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República.

4.1 Teoría de los Indicadores de Desarrollo Sustentable.

Al adherirse el Programa de Acción para el Desarrollo Sustentable o Agenda 21, suscrito por lo jefes de estado y representantes de los países asistentes a la Cumbre de la Tierra, las naciones se comprometieron a adoptar medidas en materia de sustentabilidad, así como implementar acciones orientadas al desarrollo de indicadores a través de los cuales se pueda medir y evaluar las políticas y estrategias en materia de desarrollo sustentable.

Los Indicadores de Desarrollo Sustentable (IDS) han sido desarrollados para proporcionar bases sólidas para la toma de decisiones en todos los niveles y contribuir a autorregular la sustentabilidad de los sistemas integrados del medio ambiente y el desarrollo. Estos indicadores, los cuales expresan en cierto nivel y magnitud los vínculos entre desarrollo socio-económico y los fenómenos ecológico-ambientales, constituyen un punto de referencia para la evaluación del bienestar y de la sustentabilidad de un país. Su valor se magnifica al contrastarse o correlacionarse con metas que forman parte de las políticas nacionales.

En abril de 1995, la UNCSA aprobó el programa de trabajo sobre IDS 1995 – 2000, a instrumentarse en tres fases,¹ no excluyentes, que pueden resumirse en: a) intercambio de información, desarrollo de hojas metodológicas y capacitación a nivel nacional y regional; b) continuar la capacitación y poner a prueba la funcionalidad de las hojas metodológicas entre aquellos países que, de manera voluntaria, desearan elaborar los indicadores de desarrollo sustentable, y; c) evaluación de los indicadores elaborados en términos de sus vínculos y la agregación espacial, así como realizar su refinamiento si fuese necesario [85].

La prueba piloto de la UNCSA involucra a 22 países, que de forma voluntaria, se reunieron para promover el intercambio de experiencias y recomendaciones, así como para acelerar el proceso de prueba y obtener un mayor desarrollo de los indicadores. En este contexto, la Tabla 4.1 presenta una lista de los países voluntarios para el desarrollo de los IDS.

Los procedimientos y procesos para seguir el desarrollo, prueba y uso de IDS, variará de país en país, dependiendo sobre las condiciones específicas del país, objetivos y prioridades nacionales, infraestructura disponible, conocimiento y disponibilidad de datos o información adicional para la toma de decisiones. Las características del procedimiento están identificadas como: Organización, Implementación, Análisis y Evaluación, Soporte Institucional y Capacidad de Construcción y, Reporte.

¹ Las fases para el desarrollo de indicadores de desarrollo sustentable que fueron comprendidas entre 1995 y 2000 son: Fase 1 (mayo 1995 – agosto 1996); Fase 2 (mayo 1995 – enero 1998) y; Fase 3 (enero 1999 – diciembre 2000).

Región	Países miembros
Asia y Pacífico	Maldivas, Pakistán, Filipinas, China.
África	Ghana, Kenya, Sudáfrica, Marruecos, Túnez.
Europa	Alemania, Austria, Bélgica, Finlandia, Francia, Reino Unido, República Checa.
América Latina y El Caribe	Barbados, Bolivia, Brasil, Costa Rica, México, Venezuela.

FUENTE: United Nations Commission on Sustainable Development (UNCSD)
<http://www.un.org/esa/sustdev/indi6.htm>

Tabla 4.1 Países voluntarios del programa piloto para el desarrollo de IDS.

Los indicadores propuestos por el UNCSD se diseñaron y agruparon de acuerdo con: a) criterios temáticos que cubren los expuesto en cada uno de los 40 capítulos de la Agenda 21, distribuidos en cuatro categorías (social, económica, ambiental e institucional) y, b) por su naturaleza dentro del esquema PER (Presión - Estado - Respuesta),² el cual contempla a 43 indicadores en Presión, 54 en Estado y 37 en Respuesta, siendo así un total de 134 indicadores.

Paralelamente, el esquema PER fue adoptado y modificado por la OECD,³ que en 1993 definió un grupo modular de indicadores ambientales en temas seleccionados para la evaluación del desempeño ambiental. Este modelo forma parte de los informes de sus países miembros en materia medioambiental. El esquema PER es tan solo una herramienta analítica que trata de categorizar o clasificar la información sobre los recursos naturales y ambientales a la luz de sus vínculos con las actividades sociodemográficas y económicas. Se basa en conjunto de los siguientes vínculos: las actividades humanas ejercen presión (P) sobre el medio ambiente, modificando con ello la cantidad y calidad, es decir, el estado (E) de los recursos naturales; la sociedad responde (R) a tales transformaciones con políticas generales y sectoriales, tanto ambientales como socioeconómicas, las cuales afectan y se retroalimentan de las presiones de las actividades humanas.

Adicionalmente, el modelo PER puede ser ajustado de tal manera que presente mayores detalles o características específicas de los indicadores. Por ejemplo, se encuentran los indicadores dentro del esquema Fuerza impulsora - Estado - Respuesta (FER), el cual es adaptado del esquema PER, donde la categoría

² El esquema PER fue diseñado originalmente por la Statistics Canada en 1979 y retomado por la ONU para la elaboración de cuatro manuales sobre estadísticas ambientales, concebidas éstas para su integración a los sistemas de confiabilidad física y ambiental.

³ Los países miembros de la OECD son: Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, Turquía, Reino Unido, Estados Unidos, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda, México, República Checa, Hungría, República de Corea y Eslovaquia.

presión ha sido reemplazada por la “fuerza impulsora”. Esta fuerza impulsora trasciende las actividades humanas, procesos y patrones de actividad que impactan al desarrollo sustentable y captan más adecuadamente la intervención de los factores sociales, económicos, ambientales e institucionales.

Existen otros esquemas que son utilizados por la Agencia Europea del Ambiente (Environment European Agency, EEA) y la Agencia de Protección al Medioambiente de los Estados Unidos (Environment Protection Agency, EPA), las cuales amplían a cinco las categorías de información, tratando de ser más exhaustivo el estudio de la relación sociedad – medio ambiente. El esquema está determinado por la relación Presión-Estado-Impacto/Efecto-Respuesta.

4.2 Indicadores para el Desarrollo Energético Sustentable – ISED.

La energía es esencial para el desarrollo económico y social, así como para el mejoramiento de la calidad de vida. Desafortunadamente, para lograr estos objetivos, el uso de la energía es cada día menos sustentable. La continua dependencia de energía que proviene de fuentes no renovables, seguramente provocará un colapso en la economía y un efecto irreversible en la regeneración del medio ambiente. En un esfuerzo por atender estos problemas en el sector energético, el desarrollo de indicadores energético sustentables por organismos internacionales han sido propuestos.

4.2.1 Indicadores de sustentabilidad energética en el esquema PER.

En 1999 la Agencia Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency, IAEA), a través de siete representantes de organismos internacionales y ocho países, examinaron la existencia relevante de los Indicadores para el Desarrollo Energético Sustentable (Indicators for Sustainable Energy Development, ISED) [22]. Estos indicadores fueron informalmente puestos a prueba en 15 países para valorar la calidad de los datos y disponibilidad.⁴ Una lista final de 41 indicadores fue entonces definido, incorporando los resultados y uso de criterios por el Programa de Trabajo sobre Indicadores de Desarrollo Sustentable (Work Programme on Indicators of Sustainable Development, WPISD). Los principales objetivos del WPISD son:

⁴ Los países participantes fueron Argentina, China, Cuba, Indonesia, México, Pakistán, Turquía, Estados Unidos, Federación Rusa, y países del Este y Oeste de Europa.

1. para complemento de los indicadores generales de desarrollo sustentable (ISD) siendo desarrollados por WPISD para:
 - identificar los principales problemas para ser dirigidos en conexión con el desarrollo energéticamente sustentable,
 - derivar una lista de indicadores propios para medir y monitorear estos problemas para que relaten en un desarrollo energéticamente sustentable, y,
 - asignar los caracteres Fuerza Impulsora y Estado en conformidad con el esquema PER, e identificar una lista deseable Acción de Respuesta para mejorar la sustentabilidad energética.

2. para permitir el uso de ISED para:
 - hacer modificaciones necesarias para las bases de datos relevantes de la IAEA y herramientas analíticas, así como hacer más receptivas las cuestiones del desarrollo energéticamente sustentable.

Estos objetivos han sido, y están siendo ejecutados, con la ayuda de expertos de varias organizaciones internacionales (IEA, NEA/OECD, EC, DSD/ONU-DESA, UNESCO) y estados miembros (Francia, Alemania, Holanda, India, Pakistán, Rusia, Suiza y Estados Unidos).

Actualmente, se han identificado 16 tópicos, denotados todos ellos como los principales aspectos para ser dirigidos en conexión con el desarrollo energéticamente sustentable bajo diferentes dimensiones de sustentabilidad (ver Tabla 4.2).

Como se puede apreciar en la Figura 4.1, el estado medioambiental asociado con el sistema energético resulta del impacto de las fuerzas impulsoras, originadas de la dimensión económica y social del sistema energético. Similarmente, el estado social del sistema energético es, a su vez, influenciado por determinada fuerza impulsora, originada de la dimensión económica del sistema energético. Finalmente la dimensión institucional puede afectar todas las otras tres dimensiones (social, económica y medioambiental) a través de acciones de política de respuesta correctiva que afectan el desempeño del sistema energético global.

De acuerdo con la IAEA, resultaron 41 ISED como apropiados de las dimensiones económica, social y medioambiental, y organizados bajo el modelo PER sobre las bases del modelo de las dimensiones sustentables del sector energéticos de la Figura 4.1. La lista comprende 15 indicadores de fuerza impulsora indirecta, 14 indicadores de fuerza impulsora directa y 12 indicadores

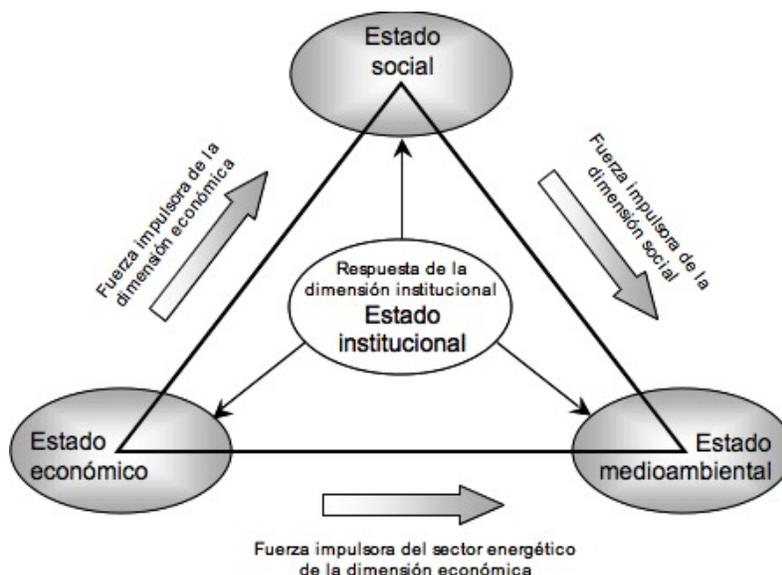
de estado. Estos indicadores son considerados como los más significantes desde el punto de vista del desarrollo energéticamente sustentable y pueden ser considerados como el núcleo de los ISED. Aunque los indicadores califican el grado de sustentabilidad de un sistema, es necesario profundizar en este tipo de estudios para garantizar la efectividad de los mismos.

Dimensión social	Disparidad energética Accesibilidad energética
Dimensión económica	Niveles de actividad económica Producción, abastecimiento y consumo de energía Precios, impuestos y subsidio de energía Intensidad energética de uso final Eficiencia de abastecimiento energético Seguridad energética
Dimensión medioambiental	Cambio climático global Contaminación del aire Contaminación del agua Desechos Degradación de los recursos energéticos Uso de la tierra Riesgo de accidentes Deforestación
Dimensión institucional	Todos los aspectos arriba mencionados tomados individualmente así como colectivamente

Tabla 4.2 Dimensiones de sustentabilidad energética.

Una crítica constructiva sobre los ISED, es que presentan ineficiencias en su aplicación. Por ejemplo, el indicador ECO3 (Eficiencia de la conversión y distribución de energía) que reporta la IAEA [22], solamente reporta un aspecto del uso de la energía y sin distinguir si es bueno o malo. En éste sentido, según la IAEA, este indicador mide la eficiencia de conversión y distribución de sistemas energéticos en varias cadenas de la oferta energética incluyendo pérdidas ocurridas durante la transmisión y la distribución de electricidad, y el transporte y la distribución de gas, en donde solamente considera los datos a partir de un balance de energía. Aquí, el aspecto metodológico debería ser modificado para evaluar los sistemas por medio de un análisis de exergía, en el cual se identifiquen las pérdidas irreversibles en la conversión de la energía en cada una de las cadenas para su oferta, es decir, que se identifiquen los parámetros exergéticos (por ejemplo, el potencial de mejoramiento exergético) para proponer solución a los problemas de optimización en los procesos. Aquí el objetivo sería

reducir las irreversibilidades en los procesos por medio de la ejecución de políticas adecuadas que promuevan de uso eficiente de energía y la investigación y el desarrollo tecnológico.



FUENTE: International Atomic Energy Agency, Indicators for Sustainable Energy Development, 2000.

Figura 4.1 Relaciones entre las dimensiones sustentables del sector energético.

4.2.2 Indicadores de sustentabilidad energética OLADE/CEPAL/GTZ.

Aquí se presenta una explicación de los diversos indicadores propuestos, en su conjunto, por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la Comisión para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). Las bases de estudio de los indicadores se encuentran reportados en [86].

El sistema energético, como subsistema social, está relacionado en muchos aspectos con el nivel y la estructura del abastecimiento energético que a su vez interactúa de modo complejo con las dimensiones económicas, sociales y medioambientales. Estas dimensiones ya se han presentado, tal y como aparecen en la Figura 4.1.

El estudio de OLADE/CEPAL/GTZ presenta una serie de indicadores los cuales pretenden señalar un conjunto de aspectos relativos al sistema energético que

afectan de diferente manera y grado la sustentabilidad del desarrollo, y que están relacionados con:

- a) riesgos, vulnerabilidades y restricciones para el desarrollo socioeconómico;
- b) sesgos inequitativos en el abastecimiento energético y posibles incoherencias en el uso de los recursos;
- c) efectos externos sobre el medio ambiente.

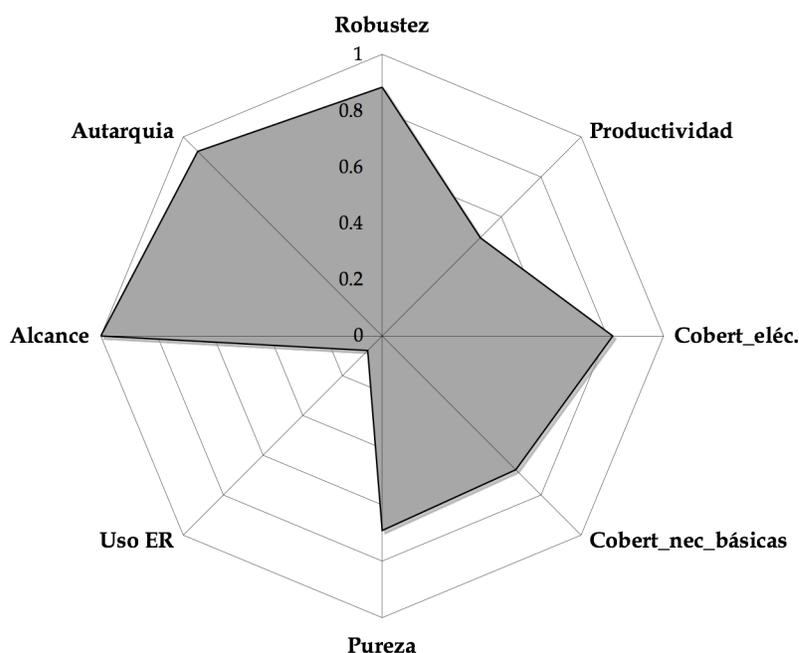
En dicho estudio, seleccionaron algunos objetivos sectoriales importantes, para los cuales les fue posible formular indicadores cuantitativos. La caracterización que emplearon fue una aproximación que permite identificar distintas tipologías y con variantes dentro de ellas. De éstos, interesó al respecto: la forma, la posición y, el tamaño de la silueta. Un ejemplo de los indicadores, se presenta en la Figura 4.2. En este ejemplo, se presentan los indicadores de sustentabilidad energética para México en el año de 1999.

La *forma* sugiere, cuanto más tiende a un octaedro, se presentará una mayor solidez de los sistemas energéticos. La solidez se sustenta en un mayor equilibrio entre las ocho dimensiones del radograma y en la posibilidad de realizar ajustes graduales en cada una de ellas para mejorar las condiciones del desarrollo sustentable.

El *tamaño* sugiere la potencialidad de unos sistemas respecto a otros. Es evidente que hay países que afrontan situaciones derivadas de ventajas naturales que favorecen su situación al margen de las posibilidades de mejorar voluntariamente su situación.

Por el contrario, hay países que, pese a sus desventajas naturales, han encontrado soluciones que los sitúa en una mejor *posición*. De modo que la potencialidad no depende tanto de las ventajas naturales que tenga cada país como de la concepción integral de sus sistemas energéticos. No obstante, existen sistemas que pueden tener igual tamaño pero distinta forma o posición. En contraste, la cuestión requiere una adecuada evaluación ya que la circunstancia no implica necesariamente igual estado respecto al desarrollo sustentable.

Los indicadores desarrollados por OLADE/CEPAL/GTZ se encuentran distribuidos en tres dimensiones, tales como: dimensión económica, dimensión social y, dimensión ambiental y recursos naturales. En este contexto, en la Tabla 4.3 se presenta la lista de dichos indicadores.



	Robustez	Productividad	Cobert. eléc.	Cobert. nec_bas.	Pureza	Uso ER	Alcance	Autarquía
1999	0.883	0.494	0.820	0.672	0.690	0.073	1.000	0.927

FUENTE: Recursos naturales e infraestructura, Indicadores de sustentabilidad 1990 - 1999, Proyecto OLADE/CEPAL/GTZ "Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe", Santiago de Chile, Agosto de 2001.

Figura 4.2 Indicadores de sustentabilidad energética para México en 1999.

Aunque el desarrollo de estos indicadores es un esfuerzo por establecer de manera cuantitativa si un país es sustentable energéticamente o no, existen ineficiencias en sus evaluaciones. Por ejemplo, el indicador de autarquía refleja alta sustentabilidad de un país si este no depende considerablemente de las importaciones de energéticos en base a sus propios recursos. En el caso de México, según el estudio de OLADE/CEPAL/GTZ, presenta una alta sustentabilidad en este rubro, sin embargo la realidad es que México es un país ineficiente y poco sustentable en el uso de sus propios recursos. Es contradictorio identificar que un país sea sustentable en términos de autarquía cuando su principal recurso energético, como es el petróleo, sea exportado en un considerable porcentaje, y posteriormente comprar productos de alto valor a precios irracionales para cubrir su oferta energética (caso de gasolinas y petroquímicos). Resulta poco creíble que este indicador califique la sustentabilidad energética. Dicho indicador debería ser evaluado a partir de la energía que es procesada en el país sin considerar la producción de energía

primaria (es decir, sin exportaciones). Seguramente el resultado será distinto e identificaremos que en realidad la sustentabilidad energética en México no es alta desde el punto de vista de la autarquía.

Indicador	Definición	Normalización
Dimensión económica		
Autarquía energética	Porcentaje en la suma de importación y producción primaria de energía.	0 = 100% 1 = 0% sin normalización
Robustez	Exportaciones energéticas sobre el PIB.	0 = 14 bep/100 \$usd 1 = 1 bep/1000 \$usd normalización lineal
Productividad energética	Inversa de la intensidad energética del PIB.	0 = \$usd/bep 1 = 1000 \$usd/bep sin normalización
Dimensión social		
Cobertura eléctrica	Porcentaje de hogares electrificados.	0 = 0% 1 = 100% sin normalización
Cobertura de necesidades energéticas	Consumo de energía útil residencial.	0 = 0 bep/hab 1 = 1 bep/hab con normalización
Dimensión ambiental y recursos naturales		
Pureza relativa	CO ₂ / consumo energético.	0 ≥ 1 t/bep 1 ≤ 0.3 t/bep normalización lineal
Uso de energías renovables	Participación de energía renovable en la oferta energética.	0 = 0% 1 ≥ 50% normalización lineal
Alcance recursos fósiles y leña	Relación entre producción y de recursos fósiles (R/P); y tasa de deforestación.	0 = 0 años; ≥ 1% 1 = 25 años; ≤ 0% normalización lineal

Tabla 4.3 Indicadores para la sustentabilidad en términos energéticos.

4.3 Indicadores de Sustentabilidad Energética en México.

La elaboración de indicadores de desarrollo sustentable en México ha sido un esfuerzo de instituciones, tales como el Instituto Nacional de Ecología (INE) [76] y recientemente por parte del Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República (IILSEN) [87], en sólo poner a prueba la capacidad y experiencia de México en la aplicación de vanguardia para el desarrollo de la información estadística sino que también ha permitido comprobar el potencial y disponibilidad de la información.

El trabajo presentado por el INE se inscribió en el programa de actividades del Comité Técnico de Información Ambiental en 1995, logrando así la publicación de los indicadores de desarrollo sustentable para México conforme al formato editorial al informe presentado por la UNCSD de 1999 [76]. En el trabajo del INE se publicaron 113 indicadores generados de un total de 134 indicadores propuestos; todos ellos conforme a la metodología del esquema PER. Dichos indicadores están divididos en cuatro dimensiones: social, económica, medioambiental, e institucional. Aunque éstos indicadores no están clasificados para el aspecto energético, aquí se hace una distinción entre ellos. La Tabla 4.4 presenta una lista de los posibles indicadores de sustentabilidad energética para México de acuerdo al esquema PER.

Indicador	Esquema PER
Consumo de combustible fósil por habitante en vehículos de motor	Presión
Consumo anual de energía por habitante	Presión
Participación de las industrias intensivas en recursos naturales no renovables en el valor agregado manufacturero	Presión
Reservas probadas de fuentes energéticas fósiles	Estado
Duración de reservas probadas de energía	Estado
Participación del consumo de recursos energéticos renovables	Estado
Uso sustentable de los recursos naturales en las áreas montañosas	Estado
Uso de energía en la agricultura	Presión
Emisiones de gases de efecto invernadero	Presión
Emisiones de óxidos de azufre	Presión
Emisiones de óxido de nitrógeno	Presión
Concentración de contaminantes en zonas urbanas	Presión
Gasto sobre abatimiento de la contaminación atmosférica	Respuesta

FUENTE: INE-INEGI, Indicadores de Desarrollo Sustentable en México, 2000.

Tabla 4.4 Posibles indicadores de sustentabilidad energética para México en el esquema PER.

La información obtenida de alguno de los indicadores de la Tabla 4.4, presentan solamente datos estadísticos del año 1990 a 1997. Dicha información en realidad no presenta una calificación de sustentabilidad. Por ejemplo, para el caso del indicador “Consumo anual por habitante”, el dato reportado para el año de 1997 (63.8 GJ/hab.) es simplemente una cifra calculada de la generación de energía entre el número de habitantes del país para ese año; el indicador nunca califica si México es sustentable en este rubro o cuáles son las acciones de política energética sobre el indicador. Resulta inapropiado presentar un indicador de desarrollo sustentable cuando no se especifica su grado de sustentabilidad (alto, medio, bajo).

En contraste, indicadores de desarrollo sustentable recientemente publicados en México por medio del IILSEN [87], demuestran la sustentabilidad de México en los aspectos económicos, sociales y medioambientales del sector energético. Los indicadores publicados fueron desarrollados conforme a la metodología de la OLADE/CEPAL/GTZ. Ahí, cada uno de ellos fueron normalizados, dando como resultado una calificación de 0 a 1 para cada uno de ellos, los cuales predicen el grado de sustentabilidad.

El trabajo presentado por Bardán et al., [87] es hasta ahora un esfuerzo para proponer políticas adecuadas de sustentabilidad energética en el país, sin embargo, algunos indicadores podrían ser modificados (o mejorados) para establecer otra visión de la sustentabilidad. Por ejemplo, y retomando el caso de autarquía energética arriba mencionada, Bardán et al. presentan un nivel alto de sustentabilidad de autarquía energética (ver Figura 4.3), sin embargo la situación en el país es totalmente diferente. Si bien es señalado en la conclusión de dicho indicador sobre el efecto causado de las importaciones de gas natural y productos refinados, entonces por qué creer que el indicador tiene un alto grado de sustentabilidad. Aquí, la causa-efecto sobre el indicador es que consideran la oferta de energía primaria en bruto, es decir, consideran la energía que se va a exportación, y por consiguiente el indicador supone una alta sustentabilidad. En otro orden de ideas, si se considerara la producción neta de energía que va a proceso (transformación) sin considerar las exportaciones y se suman las importaciones, entonces seguramente se tendría el valor de la oferta energética que será directamente transformada y/o comercializada, y en consecuencia el nivel de sustentabilidad será menos alto. Este valor se presenta en la Tabla 4.5 como propuesta para el cambio de metodología de dicho indicador: los valores corresponden al año 2004.

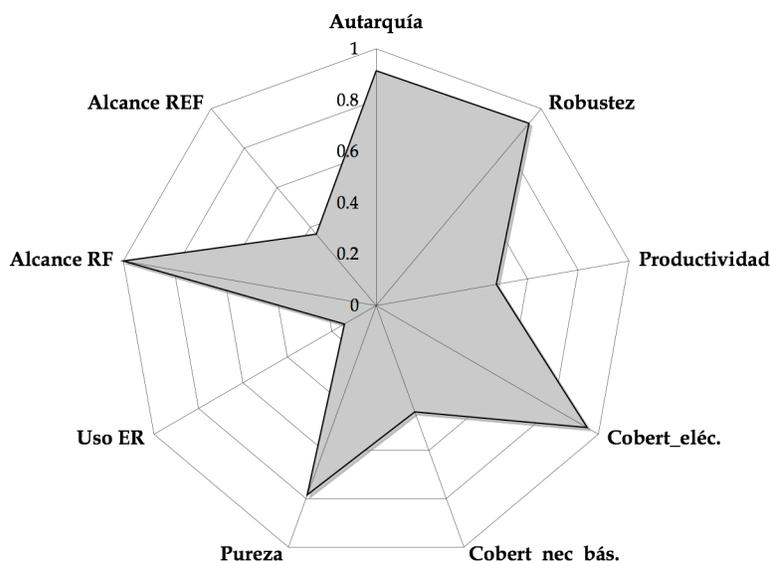
Año	Producción energía primaria (PJ)	Importaciones (PJ)	Oferta de energía (PJ)	Autarquía energética	Nivel de sustentabilidad
Indicador presentado conforme al estudio de Bardán et al. [87].					
2004	10,330.774	1,001.604	11,332.378	0.9116	Alto
Indicador propuesto.					
2004	6,204.224 ⁽¹⁾	1,001.604	7,205.828	0.8610	Medio Alto

(1) La producción de energía primaria no contempla la energía que se va a exportación (4,126.550 PJ).
 FUENTE: Datos tomados del Balance Nacional de Energía 2004, Secretaría de Energía, México, 2005.

Tabla 4.5 Indicador de autarquía energética para México del año 2004.

En consecuencia, el resultado del indicador propuesto de autarquía energética se presenta con un valor menor de sustentabilidad de acuerdo con el valor de la

Tabla 4.5. Esto quiere decir en realidad que el país no es tan sustentable como lo habíamos percibido, sino que tiene ineficiencias en su política energética para aprovechar su capacidad de producción de energía primaria y ser transformada casi en su totalidad para generar energéticos con mayor valor agregado, dando como posible resultado la no dependencia de las importaciones de otros países.



	Autarquía	Robustez	Productividad	Cobert. eléc.	Cobert. nec_bás	Pureza	Uso ER	Alcance RF	Alcance REF
2002	0.9145	0.9271	0.4743	0.950	0.4414	0.7844	0.142	1.00	0.362

FUENTE: “Energía y Desarrollo Sustentable en México”, Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República (IILSEN), 2004.

Figura 4.3 Indicadores de sustentabilidad energética para México en 2002.

Considerando el caso de la producción de petróleo crudo en México, éste no es explotado en su totalidad por la falta de capacidad de refinación y petroquímica básica. Seguir con la política de ser un exportador de su máximo recurso energético, es totalmente absurdo. México exporta casi el 55% de la producción de petróleo crudo, para luego convertirse en importador de energéticos con mayor valor agregado como son las gasolinas. Este es un sinónimo de insustentabilidad energética, debido a que al país le sale más caro mandar a maquilar su propio petróleo, en vez de invertir en su propio país y pueda obtener el máximo beneficio al producir energéticos con mayor valor agregado. Si esto lograra a suceder, entonces podríamos referirnos a que la industria de la refinación de petróleo en México sería rentable y sustentable, además de

transformarse un país exportador de productos refinados con mayor valor, sin embargo no existe la voluntad para llevarlo a cabo.

A pesar de todo, estos indicadores reflejan el grado de sustentabilidad energética permisibles y establecen el camino para la propuesta de políticas energéticas adecuadas con el objetivo de mejorar la calidad de vida del ser humano del presente sin comprometer la de futuras generaciones.

SEGUNDA PARTE

Capítulo V

El Sector Petrolero en México.

En este primer capítulo de la segunda parte, se presenta una descripción de la situación operativa del sector petrolero mexicano del año 2004. Se estudia el comportamiento que sostuvo la extracción y producción de productos petrolíferos y la elaboración de petroquímicos correspondientes a cada subsidiaria de Petróleos Mexicanos: Pemex Exploración y Producción (PEP), Pemex Refinación (PR), Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB) y Pemex Petroquímica (PPQ). Además, se presenta brevemente la situación de la investigación y desarrollo tecnológico en México y desarrollado fundamentalmente por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

5.1 El Petróleo y su Contexto Internacional.

El petróleo¹ es un compuesto químico complejo en el que coexisten partes sólidas, líquidas y gaseosas. Lo forman, por una parte, unos compuestos denominados hidrocarburos, formados por átomos de carbono e hidrógeno y, por otra, pequeñas proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Se presenta de forma natural en depósitos de roca sedimentaria y sólo en lugares en los que hubo mar.

Existen tres grandes categorías de petróleo crudo:

a) Petróleo de tipo parafínico: El petróleo parafínico está compuesto por moléculas en las que el número de átomos de hidrógeno es siempre superior en dos unidades al doble del número de átomos de carbono. Son de color claro, fluidos y de baja densidad (0.75 a 0.85 g/ml). De éstos se extrae gran cantidad de gasolina, queroseno y aceites lubricantes.

b) Petróleo de tipo asfáltico: Las moléculas características del petróleo asfáltico son los naftenos, los cuales contienen exactamente el doble de átomos de hidrógeno que de carbono. Son negros, viscosos y de elevada densidad (0.95 g/ml). De éstos se extrae poca gasolina y aceite combustible (fuel oil), por lo que queda residuo asfáltico.

c) Petróleo de base mixta: El petróleo de base mixta contiene hidrocarburos de ambos tipos

La industria mundial de hidrocarburos líquidos clasifica el petróleo de acuerdo a su densidad API (parámetro internacional del American Petroleum Institute, que diferencia las calidades del crudo). La clasificación de calidad del petróleo se presenta en la Tabla 5.1, los cuales son usados a nivel mundial.

	Densidad (g/cm ³)	Densidad API
Extrapesado	> 1.0	10.0
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

Tabla 5.1 Clasificación del petróleo de acuerdo a su densidad API.

¹ El significado etimológico de la palabra petróleo es “aceite de piedra”, por tener la textura de un aceite y encontrarse en yacimientos de roca sedimentaria.

Por otra parte, y de manera general, el uso del petróleo es muy versátil. Para extraer el máximo valor del crudo, primeramente necesita ser refinado para obtener otros productos. El mejor conocido de éstos es la gasolina. Sin embargo hay muchos otros productos que pueden ser obtenidos cuando un barril de crudo es refinado. Entre ellos se encuentran en gas licuado de petróleo (LPG), nafta, queroseno, gas oil y fuel oil; todos éstos son combustibles. Otros productos utilizados los cuales no son combustibles también pueden ser manufacturados por una refinería de petróleo, tales como lubricantes y asfaltos (usados en pavimentación de carreteras). Un amplio rango de sub-productos como perfumes e insecticidas son también derivados del petróleo.

Además, diversos productos arriba mencionados, tales como nafta, gasoil, LPG y etano, pueden ellos mismos ser usados como materia prima o almacenamiento para la producción de petroquímicos. El principal grupo de petroquímicos finales son plásticos, fibras sintéticas, caucho sintético, detergentes y fertilizantes químicos.

Considerando el vasto número de productos que son derivados del petróleo, éste es una sustancia muy versátil. La vida como ahora la conocemos podría ser extremadamente difícil sin este energético y sus sub-productos.

En otro sentido de ideas, la producción de petróleo ha presentado un crecimiento importante en la última década. Entre 1995 y 2005 el crecimiento en la producción de petróleo fue de 19.2%, fijándose en este último con una producción de 81,198 mbd. Similarmente, el consumo de petróleo en este mismo periodo presentó un crecimiento de 18.6%, ubicándose con un total de 82,459 mbd a final de 2005. Se prevé que el ritmo de crecimiento anual en el consumo será de 1.6% anual de aquí al 2030, según reportes de la IEA [88].

En cuanto a las reservas probadas, el crecimiento es significativo a partir de 1985. Para ese año, las reservas probadas presentaron un valor de 770.4 miles de millones de barriles (mmbb), y al final de 2005 con un valor de 1200.7 mmbb. Esta diferencia representa un crecimiento de 55.8% en un periodo de 20 años. El futuro, aunque incierto, presentará una gran inclinación por la búsqueda de nuevos campos petroleros para aumentar las reservas. Cada vez la búsqueda de petróleo presentará un mayor costo, y sobre todo para su extracción. Aunque se publican en distintos foros internacionales sobre la búsqueda de otros recursos energéticos (caso de energías renovables e hidrógeno) y el valor que ellos representan, se seguirá apostando por la explotación del petróleo como la principal fuente de energía mundial.

En este apartado, según reportes de la IEA, la demanda mundial de petróleo crecerá 1.57 mbd en 2007, siendo éste un nivel superior que en 2006. Esta expectativa se dará debido al crecimiento de la economía mundial,

principalmente por la recuperación del consumo en América del Norte y en los países de Asia no miembros de la OCDE. En referencia, la demanda de crudo deberá alcanzar los 86.4 mbd en 2007, lo que representa un alza de 1.8%. Asimismo, se estima que el 75% del incremento de la demanda de petróleo durante este siglo corresponderá al sector transporte.² De aquí al 2020 se espera que la demanda aumentará, si bien se asegura una fuerte declinación de la producción en la mayoría de los países productores de petróleo convencional³ fuera del Medio Oriente.

La aceleración de la demanda respecto a la década anterior debería continuar en los próximos cinco años, pese a la alza en el precio del barril por el crecimiento económico registrado en China e India en particular. En cuanto a la oferta, la IEA pronosticó un crecimiento de la oferta de crudo de los países no miembros de la OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries)⁴. En contraste, la oferta de productores no miembros de la OPEC aumentará 1.7 millones de barriles el próximo año y la de la OPEC en 800 mbd.

Los hidrocarburos seguirán siendo la base de la producción de energía en el mundo durante varias décadas más y tendrán un papel central en la industria energética durante todo el siglo 21.

5.2 El Sector Petrolero en México.

La industria petrolera en México surgió a principios del siglo pasado, cuando se descubrió petróleo mediante un pozo llamado "Doheny I".⁵ A partir de allí, se siguió con la búsqueda de nuevos pozos y dio comienzo la activación de la industria petrolera por medio de firmas extranjeras. No hasta 1938, cuando se da la Expropiación Petrolera, se consolida una empresa cien por ciento mexicana, la cual es decretada el 7 de junio del mismo año, llamándola Petróleos Mexicanos (Pemex).

Pemex es una entidad descentralizada del gobierno federal, con personalidad jurídica y patrimonio propios, que tiene por objeto ejercer la conducción central y la dirección estratégica de todas las actividades que abarca la industria petrolera

² El petróleo continuará como principal combustible en el transporte por tierra, aire y mar, probablemente durante medio siglo más, aunque en algún momento podría ser sustituido en gran parte por el hidrógeno; probablemente después del año 2030.

³ El petróleo convencional es el petróleo que se puede extraer a costos económicamente rentables.

⁴ Miembros de la OPEC son: Algeria, Indonesia, Irán, Kuwait, Libia, Nigeria, Qatar, Arabia Saudita, y Emiratos Árabes Unidos.

⁵ Nombre impuesto por el estadounidense Edward L. Doheny, quien creó la empresa "Mexican Petroleum of California" en 1901.

y que se enumeran en el artículo 3 de la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en el ramo petrolero.⁶ De esta manera, Pemex goza de exclusividad, protegida constitucionalmente, sobre la exploración y la producción de los hidrocarburos, la refinación y la petroquímica básica. Es la única empresa que puede explorar, explotar, transportar y procesar petróleo crudo en territorio nacional. Asimismo tiene la obligación del suministro de los combustibles y el gas LP en todo el país.

Con la entrada en vigor de la ley orgánica de Pemex y organismos subsidiarios en 1992, se constituyeron cuatro organismos descentralizados de carácter técnico, industrial y comercial, coordinados por un corporativo, los cuales son: Pemex Exploración y Producción (PEP), Pemex Refinación (PR), Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB), y Pemex Petroquímica (PPQ). En los siguientes párrafos se describen las características generales de cada una de las subsidiarias antes mencionadas.

5.2.1 Pemex Exploración y Producción – PEP.

Pemex Exploración y Producción (PEP) es el organismo encargado de la exploración y explotación de los yacimientos de petróleo y gas natural, así como de su transporte y almacenamiento en terminales. Sus actividades se concentran en el noreste y sureste del país y, costa fuera, en la Sonda de Campeche y en otras partes del Golfo de México. PEP está subsidiada en cuatro zonas geográficas: región norte, región sur, región marina y región sureste.

Los hidrocarburos que produce PEP son: crudo Maya (22 °API y 3.3% p. azufre), crudo Istmo (33.6 °API y 1.3% p. azufre), crudo Olmeca (39.3 °API y 0.8% p. azufre), naftas y condensados, gas amargo y gas dulce.

PEP cuenta con 355 campos de producción de petróleo crudo y gas natural, 5,286 pozos en exploración y 185 plataformas marinas. Con ésta capacidad instalada, PEP logró una producción de petróleo crudo de 3,383 mbd (miles de barriles diarios) y una producción de gas natural de 4,573 mmpcd (millones de pies cúbicos diarios) en 2004, respectivamente [89]. En este contexto, el campo con mayor producción de crudo y gas natural fue Cantarell, participando con 2,079 mbd y 759 mmpcd respectivamente. Ahora bien, si se considera la producción de hidrocarburos por medio del activo integral,⁷ entonces se determina que el

⁶ El artículo 27 constitucional establece que corresponde exclusivamente a la nación el dominio directo del petróleo y de todos los carburos de hidrógeno sólido, líquidos o gaseosos. Además, en los artículos 25 y 28, la Constitución marca una diferencia entre las áreas energéticas –funciones exclusivas del estado- y las actividades prioritarias para el desarrollo, en las que el estado puede participar por sí mismo o en conjunto con los sectores privado y social, manteniendo la rectoría y otorgando permisos y concesiones.

⁷ A partir de 2004, la estructura administrativa de PEP cambió a activos integrales.

mayor productor de gas natural fue la cuenca de Burgos, el cual tuvo una producción de 1,094 mmpcd.

La producción anual de hidrocarburos ha crecido de forma discreta, siendo esta de un 2.3% de crecimiento promedio anual a partir de 1999. Respecto a las reservas totales de hidrocarburos, el panorama no es alentador, ya que estas presentan un agotamiento en el periodo 1999 - 2005 de un 18.7%. Aunque los propósitos de funcionarios de Pemex en dar cifras alentadoras respecto a las elevadas tasas de reposición de las reservas,⁸ la realidad es que todo indica que las reservas podrían seguir disminuyendo peligrosamente en los próximos años en los que se pretende seguir elevando la producción. En este apartado, Pemex no ha descubierto nuevos yacimientos gigantes y súper gigantes, ni parece muy factible que PEP los descubra, salvo que empiece a explorar en aguas profundas. La caída en las reservas de hidrocarburos se ha convertido en un asunto crítico en la política petrolera del país, y no resulta nada alentador mientras se continúe con la visión de aumentar la producción de éstos mismos, por lo que daría como resultado que México se convierta en un importador neto de petróleo crudo en las próximas décadas.

Realizando un cálculo sencillo, y considerando las reservas probadas de hidrocarburos del año 2005, México sería autónomo de hidrocarburos solamente para los próximos 11 años, al mantenerse una tasa de producción de los mismo conforme al año 2004; todo esto, desde luego, al mantenerse con los precios, tecnología y no incorporación de reservas probadas en el corto plazo. Lo anterior podría traer como consecuencia que México tendrá que disminuir sus exportaciones de crudo en el futuro cercano, como resultado del crecimiento de su demanda interna y por la preocupante disminución de sus reservas y, por ende, de la producción. Con relación al primer factor, es evidente que el crecimiento de la economía del país en los próximos años conllevará un aumento en su consumo energético; en tal escenario los hidrocarburos juegan el papel esencial.

5.2.2 Pemex Refinación – PR.

Pemex Refinación (PR) lleva a cabo los procesos industriales de la refinación, elabora combustibles y otros derivados del petróleo (como gasolinas, diesel, combustóleo, turbosina, asfaltos y lubricantes) y los almacena, transporta, distribuye y comercializa. Transporta combustibles a través de ductos, carrotanques, ferrotanques y buquetanques. PR cuenta con una infraestructura

⁸ En el año 2003, funcionarios de Pemex informaron en varias ocasiones que “ya le estaban dando la vuelta” a la declinación y en el 2002 habían logrado una tasa de reposición del 40.6% del petróleo extraído en el año y esa tasa de reposición llegaría a 75% entre 2005 y 2006.

de seis refinerías en todo el país, encontrándose en el doceavo lugar de refinerías instaladas a nivel mundial; México comparte lugar con Holanda, Turquía, Ucrania, Corea del Sur, Malasia y Nueva Zelanda [90].⁹ En la Tabla 5.2 se presenta detalladamente la capacidad instalada de cada una de las refinerías. Además, desde 1993, Pemex coinvierte con Shell una refinería en Estados Unidos con el 50% de su participación, siendo la refinería Deer Park en Houston, Texas; negocio enfocado para la aportación de gasolinas bajo un esquema de maquila.

Las refinerías en México forman el Sistema Nacional de Refinación (SNR), el cual presentó una capacidad instalada total de 1,504 mbd de destilación primaria de petróleo crudo en el año 2004; dicha capacidad, coloca a Pemex entre las once compañías más importantes en refinación a nivel mundial, sin embargo, su capacidad no se ha aumentado en los últimos 15 años y no se ha construido una nueva refinería en 24 años. Aunque cierto, y de acuerdo con Rodríguez-Padilla [91], la industria de la refinación en México es un tema mediático debido a las prácticas irresponsables de los actores políticos en querer convencer a los mexicanos que construirán refinerías en menos de cuatro años.¹⁰

Mientras los objetivos de Pemex están planteados en el aumento de producción de hidrocarburos y la exportación de petróleo crudo, la industria de la refinación en México a sobrevivido; pero no por mucho tiempo si se sigue con la misma política de creer que la refinación no es un negocio. En el plan de negocios de Pemex del periodo 2002 - 2012, se previó que PR recibirá sólo 15% del presupuesto de inversión de la empresa, mientras el 80% se destinará a PEP. En informes más recientes, Pemex confirmó que sólo el 4% de sus inversiones correspondían al corporativo PR, nivel que limita severamente sus opciones de crecimiento [92].

La industria de la refinación en México ha presentado un decremento en la elaboración de petrolíferos durante la última década. A partir del año de 1994, PR tuvo una tasa de decremento de elaboración de petrolíferos de 3.0% anual, y no hasta 1998 cuando tuvo una ligera recuperación, llegando a los 1,328.8 mbd de elaboración de los mismo [89]. Sin embargo, nuevamente la caída en la elaboración de petrolíferos se presentó, llegando hasta una elaboración de 1,275.9 mbd para el año de 2002, representando una tasa de decremento del 4.0% en ese periodo. No hasta el año de 2003, cuando se vuelve a incrementar la elaboración de petrolíferos, llegando a situarse en el orden de los 1,342.9 mbd en ese mismo

⁹ Estados Unidos ocupa el primer lugar, con más de 153 refinerías instaladas.

¹⁰ Es el caso en las políticas planteadas en la campaña presidencial de Felipe Calderón, manifestó en sus discursos proselitistas, y de acuerdo a lo publicado por Rodríguez-Padilla [91], *que prometía la construcción de cuatro refinerías en un periodo record y en donde las pidan, en la zona más pobre si quisiéramos, y sin quitarle un centavo a Pemex*. Este planteamiento es incongruente, y ahora que ha ganado la contienda electoral el Lic. Calderón, es casi seguro que no logrará esta propuestas plateadas dentro su campaña. Presentará una lucha constante de poder legislativo, además que no cuenta con la mayoría en la Cámara para poder resolver los problemas de envergadura que demanda el país.

año. Empero, la demanda de petrolíferos en el país es grande y la capacidad de elaboración de los mismos es insuficiente.

Refinería	Ubicación	Capacidad instalada (mbd)
Cadereyta	Nuevo León	212.8
Madero	Tamaulipas	145.3
Minatitlán	Veracruz	167.0
Salamanca	Guanajuato	198.6
Salina Cruz	Oaxaca	287.9
Tula	Hidalgo	291.9

Tabla 5.2 Capacidad instalada por refinería al año 2004.

Aunque los esfuerzos por hacer más eficientes las refinerías, por medio de la “reconfiguración” de las refinerías, no han existido avances importantes en el crecimiento de la oferta de los petrolíferos. Pemex ha llevado a cabo dos fases de reconfiguración de las refinerías. La primera conocida como “paquete ecológico”, que ocurrió entre 1990 - 1995, y la segunda se llevó a cabo en cuatro refinerías (Cadereyta, Madero, Tula y Salamanca) a partir de 1995. El gasto ha sido del orden de 5,000 Musd (millones de dólares) en cada fase y en ambas la prioridad ha sido la de elevar la calidad de los productos, no los volúmenes [92]. La segunda fase continúa ahora con la quinta refinería, la de Minatitlán, donde sí se proyecta un incremento en la capacidad del proceso de crudo, que debe aumentar en más de 80 mbd para ubicarse en alrededor de 350 mbd al término de su reconfiguración en 2008. Falta comenzar la reconfiguración de la sexta refinería, que es la de Salina Cruz, sin embargo todavía sigue el debate si construir una nueva refinería en aquel lugar del país o modernizar la infraestructura actual.

La mayor producción de petrolíferos se da por la elaboración de gasolinas, en la que destaca la gasolina Pemex Magna, con un volumen de elaboración de 418.5 mbd en 2004. Seguida está la elaboración de combustóleo, presentando un volumen de 368.0 mbd, y en tercer sitio, la elaboración de Pemex Diesel con un volumen de 319.6 mbd, correspondientes al mismo año [93]. No obstante, la elaboración interna de alguno de ellos, no satisface la creciente demanda. Es el caso particular de las gasolinas. México es importador del 24.1% de gasolinas en relación a su elaboración interna, por lo cual, se ha enfrentado a un rezago comercial debido a la elevada demanda de dicho combustible. Se prevé una demanda de este combustible al 2008 en el orden de 699 mbd y de 799 mbd en el 2012. En consecuencia, si se apuesta por seguir siendo un exportador y maquilador del propio recurso energético como es el petróleo, y no se le da un enfoque adecuado para obtener productos con mayor valor agregado como son

las gasolinas (y petroquímicos), la industria de la refinación mexicana se convertirá en una oportunidad de rescate para los accionistas extranjeros y hacer de ella un negocio redondo al contar con autonomía de gestión y control de las decisiones, y entonces sí, convertirla en una industria súper rentable.

Recientemente, Pemex prevé invertir en PR casi 21 millones de pesos para fortalecer la seguridad y protección ambiental, ampliar el mantenimiento de instalaciones productivas e incrementar su capacidad de procesamiento [94]. Aunque los objetivos son limitados, en el horizonte de mediano plazo y ante un entorno atractivo de oferta, demanda y diferenciales de precios, se confirma que las inversiones planteadas, sujetas a la disponibilidad de recursos y la oportunidad de las administraciones, permitirán el logro de los objetivos estratégicos, relativos a aumentar el valor futuro de los activos, impulsar la eficiencia operativa, diversificar la capacidad productiva y desarrollar la competitividad.

5.2.3 Pemex Gas y Petroquímica Básica – PGPB.

Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB) realiza el procesamiento, transporte y venta del gas natural y sus líquidos. Comercializa gas natural y gas licuado de petróleo (GLP) en todo el país y elabora y vende diversos insumos petroquímicos. Cuenta con siete filiales dedicadas al comercio del gas, a la construcción de gaseoductos, a la producción, comercialización y transporte de azufre, y al manejo de terrenos.¹¹ Asimismo, cuenta con once centros procesadores de gas, los cuales están distribuidos en los estados de Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. En la Tabla 5.3 se presentan cada una de los centros de procesamiento de PGPB denotando su capacidad de producción al año 2004.

PGPB procesa principalmente gas natural y condensados. A finales de 2004 procesó un volumen de 3,963 mmpcd de gas natural y 107 mbd de condensados [89]. En sus centros procesadores, PGPB produce gas seco, gas licuado, etano, azufre, gasolinas naturales y petroquímicos básicos. La producción de algunos de ellos es apoyada por las refinerías, que son parte de la estructura de PR. Cuenta con 20 plantas endulzadoras, 17 plantas criogénicas y 17 terminales de distribución.

La cadena industrial de PGPB consiste en tres procesos básicos, que son: 1) Endulzamiento, en donde se eliminan gases ácidos y se recupera azufre que posteriormente se coloca en el mercado nacional e internacional, 2) Recuperación

¹¹ Las siete filiales de PGPB son: Mex Gas International, Ltd., CH4 Energía S.A. de C.V., Gaseoductos de Chihuahua S. de R.L. de C.V., Pan American Sulphur, Ltd., Pasco International, Ltd., Pasco terminals, Inc., y Terrenos para Industrias, S.A.

de licuables vía plantas criogénicas, y es donde se produce gas seco e hidrocarburos líquidos y, 3) Fraccionamiento de hidrocarburos, en donde las corriente de hidrocarburos líquidos proveniente de las plantas criogénicas se separan el etano, el gas licuado y las gasolinas naturales. Los productos de PGPB se transportan a sus centros de consumo principalmente a través de ductos, barcos, autotanques y carrotanques.

La oferta de gas natural seco por medio de PGPB no satisface la demanda de dicho energético, por lo que su importación es obligatoria. La elaboración total de gas seco en PGPB al cierre de 2004 fue de 3,144 mmpcd, y ha presentado un incremento discreto en su elaboración de 2.18% promedio anual a partir de 1994. La importación de gas natural seco fue de 765.6 mmpcd en 2004, lo que representó un gasto de aproximadamente 1,715 Musd [93]. Un crecimiento acelerado de las importaciones se dio en el año 2002, cuando dichas importaciones pasaron de 292.2 mmpcd en 2002 a 592.5 mmpcd a finales de 2003, presentando a partir de allí un crecimiento de las mismas en el orden de 1.1% anual.

Centro de Procesamiento	Proceso de Gas (mmpcd)
Ciudad Pemex	1,011
Nuevo Pemex	766
Cactus	1,431
La Venta	65
Morelos	--
Cangrejera	--
Pajaritos	--
Matapionche	81
Poza Rica	100
Arenque	34
Burgos	241
Reynosa	233

FUENTE: Anuario estadístico 2005 de Petróleos Mexicanos, 2006, México.

Tabla 5.3 Capacidad de producción por centro de procesamiento de gas de PGPB en 2004.

En términos generales, la oferta nacional de gas natural en el 2004 fue de 5,750 mmpcd, de los cuales, el 19.5% corresponden a importaciones. En ese mismo año, la estructura del mercado de gas natural demandó un 19.4% a los consumos del sector petrolero, 21.0% más en las recirculaciones internas del sector petrolero, 21.8% para el sector industrial, 35.9% en el sector eléctrico, 1.5% fue al sector residencial, 0.3% al sector servicios y el resto fue consumido en el sector autotransporte. Se espera que la demanda en los próximos 10 años experimentará un crecimiento promedio anual de 5.2% hasta llegar a los 9,493

mmpcd en el 2014, según las proyecciones de la Secretaría de Energía [95]. En este contexto, el sector eléctrico mantendrá un auge del mercado al absorber el 45.4% del consumo en ese mismo año.

En lo que respecta a la elaboración de petroquímicos básicos,¹² PGPB elabora productos como hexano, heptano, pentanos, naftas, etano, materia prima para negro de humo, propano, butano, azufre, solvente L, solvente K y solvente de absorción [93]. Entre los petroquímicos básico, el azufre es el producto con mayor volumen de elaboración, colocándose en los 539.4 mt (miles de toneladas) en 2004, seguido del negro de humo con 265.8 mt en el mismo año. En lo que respecta a esta industria, la petroquímica se encuentra en decadencia en México, incluso, se han hecho pronunciaciones en donde definen a la industria petroquímica mexicana en quiebra técnica desde ya hace varios años.

5.2.4 Pemex Petroquímica – PPQ.

Pemex Petroquímica (PPQ) realiza procesos industriales petroquímicos que no sean el procesamiento básico del gas natural. Elabora 39 productos petroquímicos, en los que se encuentran los petroquímicos básicos y petroquímica secundaria.¹³ En 1996 fue dividida en ocho empresas filiales de acuerdo con la ubicación geográfica de los activos. Estas son: Petroquímica Cosoleacaque, Petroquímica Escolín, Petroquímica Tula, Petroquímica Camargo, Petroquímica Cangrejera, Petroquímica Morelos, Petroquímica Pajaritos y Petroquímica San Martín Texmelucan. En la Tabla 5.4 se presenta la capacidad de producción a final de 2004 para cada complejo petroquímico.

PPQ se ha convertido en una industria con graves problemas de operación, en la cual presenta un déficit en su capacidad de elaboración de petroquímicos de 52.3% en el periodo 1994 - 2004. Petroquímicos como el metil terbutil eter (MTBE), percloroetileno, cumeno, isopropano, polipropileno, pentanos, polímero petroquímico y tetracoloro de carbono se han dejado de producir por la falta de inversión para incrementar la capacidad instalada. Un caso en particular, es el que se distingue por la elaboración de MTBE. El MTBE es un petroquímico muy importante para la producción de gasolinas ultra limpias, y resulta incoherente que Pemex no tenga la disponibilidad de elaborar tan importante petroquímico para satisfacer a su propia industria de refinación.

¹² En realidad, los petroquímicos básicos son hidrocarburos naturales y no son productos naturales. Estos básicos son los hidrocarburos gaseosos presentes en gas natural, así como las naftas y gasolinas naturales. Todos estos básicos sirven de insumos en la refinación y petroquímica.

¹³ Considerados como petroquímicos secundarios, son éstos los que pueden ser producidos libremente por la iniciativa privada.

De igual modo, los productos petroquímicos derivados del metano han presentado la mayor caída en su elaboración, siendo esta del 71.8% en el periodo 1994 - 2004. En seguida, el propileno y sus derivados presentaron una caída de 66.4% en su producción. En este mismo escenario, los derivados del etano y los aromáticos han tenido una caída entre 31.8% y 28.1% respectivamente [89].

Complejo Petroquímico	Capacidad de Producción (mt)
Cosoleacaque	4,975
La Cangrejera	3,255
Morelos	2,263
Pajaritos	1,021
Escolín	337
Camargo	333
San Martín Texmelucan	288
Tula	76

FUENTE: Anuario estadístico 2005 de Petróleos Mexicanos, 2006, México.

Tabla 5.4 Capacidad de producción de complejos petroquímicos en el año 2004.

La producción petroquímica de Pemex va en picada. Es una industria rezagada tecnológicamente y se ve atada por un marco jurídico insostenible y burocrático. Aunque la petroquímica secundaria está abierta al 100% para la inversión privada, no se vislumbra una reactivación por aquel sector. Ellos no quieren invertir en plantas nuevas debido a la falta de garantías en el abasto de materias primas y a la poca competitividad de la petroquímica mexicana en el mundo. Por ejemplo, México es el primer país importador de fertilizantes nitrogenados en el mundo, a pesar de que tiene plantas (públicas y privadas) para producirlos; consecuencia de esto, se debe porque las plantas están cerradas debido a la falta de disponibilidad del gas o al precio poco competitivo de ese insumo.

Se espera que en los próximos tres años se importarán petroquímicos de distintos mercados a los de Estados Unidos y Canadá. Los consumidores de petroquímicos en México buscarán desesperadamente fuentes de suministros de países como Brasil, Venezuela, Bolivia, Asia y Medio Oriente. Es el caso en la producción de etileno y para-xileno, en la que PPQ apenas ofrece el 30% de su demanda nacional; el 70% restante (1'620,000 toneladas) se cubre con importaciones de Estados Unidos y Canadá.

Después de varios intentos por reactivar la industria petroquímica mexicana, específicamente la de PPQ, por medio de la reclasificación de sus productos, la venta de sus plantas, la desintegración de sus complejos y transformación de los mismos en empresas privadas y para luego subastarlas, no se ha logrado dicha reactivación. Esfuerzos por llevar a cabo proyectos de nueva infraestructura

(caso proyecto El Fénix), han fracasado por la falta recursos económicos y una política hacendaría mediocre .

Casi como un respiro para buscar una solución al problema de la petroquímica, en mayo de 2006 se anunció nuevamente la integración de los complejos para dar paso a las alianzas entre Pemex y la iniciativa privada [96]. Según funcionarios de Pemex, una vez integrados los complejos, en Pemex empezarán a operar consorcios, lo cual daría la posibilidad de invertir en asociación, es decir, como Pemex y no como sociedad anónima, que es como actualmente opera. Los consorcios estarían formados mayoritariamente por capital privado, donde la paraestatal aportará entre el 20% y 25% del costo total del proyecto.

Como prueba de ello, a más tardar, según Pemex, en octubre de 2006 PPQ iniciará la construcción de una planta de etileno en Morelos, que es el trabajo alternativo que surgió tras la caída del mega proyecto El Fénix. Este primer proyecto se aseguró por la alianza financiera, tecnológica y comercial con la compañía canadiense Nova Chemicals y también la mexicana Empresas Derivadas del Etileno (Idesa). El consorcio invertirá cerca de 2,000 Musd en la planta de etileno.

5.3 La Investigación y Desarrollo Tecnológico en el Sector Petrolero Mexicano.

Es bien sabido que la investigación y desarrollo tecnológico (I&DT) es un motor en la economía de cualquier país, y existiendo una sinergia con la industria petrolera, este tiene un impacto sustancial en el crecimiento energético, económico, ecológico y social.

En México, el organismo encargado en materia de I&DT en el sector petrolero es el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Creado el 23 de agosto de 1965, y decretado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de agosto del mismo año,¹⁴ el IMP ha realizado la importante labor de proporcionar la innovación científica y tecnológica en el ramo petrolero, así como la formación del recurso humano calificado para el desarrollo de nueva tecnología propia [97].

El IMP tiene entre sus objetivos estratégicos la innovación, la comercialización y desempeño financiero, su excelencia operacional y el posgrado. Al cierre del año

¹⁴ Dicho decreto se reformó en varias ocasiones mediante publicaciones en el Diario Oficial de la Federación con fecha 5 de noviembre de 1968, 21 de febrero de 1974, 29 de octubre de 1986 y la última expedida por el Lic. Vicente Fox Quezada el 30 de octubre de 2001.

2005, el IMP presentó una plantilla de 5,628 trabajadores, de los cuales 1,928 tienen contratos de honorarios. Cuenta con 870 personas dedicadas a proyectos de I&DT, de los cuales 270 son doctores, 173 maestros y 427 como otros. De aquí, cuenta con 180 investigadores que pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Adicionalmente, presentó 228 publicaciones, 136 participaciones en congresos, 90 derechos de autor, 13 patentes solicitadas, y 3 patentes concedidas [98].

Derivado de la investigación y el desarrollo tecnológico, el IMP es la institución que mayor número de patentes genera en el país. De 1978 a la fecha ha presentado 807 solicitudes nacionales y 80 en el extranjero, en total 887. Le fueron concedidas 558 nacionales y 57 en el extranjero; actualmente tiene 334 patentes vigentes, 323 en el país y 11 en el extranjero y en trámite 127 (124 en México). Así mismo, cuenta con 947 certificados de derechos de autor, de los cuales 534 son programas de cómputo y las 413 restantes son obras técnicas como manuales de operación y reportes técnicos, entre otros [99]. Para el año 2006, el IMP tiene un objetivo de 26 patentes por generar, según el informe de Sener [100].

Sin ser pesimista, pero realista, el IMP tiene un rezago importante en la generación de patentes. Es incomprensible que teniendo laboratorios de punta a nivel nacional e internacional,¹⁵ el IMP no tenga la capacidad de generar un mayor número de patentes anualmente. Una respuesta a este rezago, es la falta de inversión en I&DT en México; específicamente, Pemex invierte solamente 0.1 de sus gastos de inversión como porcentaje de sus ventas en I&DT, mientras la compañía Noruega, Statoil, invierte 0.8 en este mismo rubro.¹⁶

Un estudio en particular sobre las realidades y retos del IMP, se presenta un diagnóstico sobre las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del instituto [101]. Aunque realista en alguno de sus diagnósticos, el documento presenta recomendaciones un tanto irresponsables. Según Bazán y Nava, autores de dicho estudio, recomiendan que el IMP debería eliminar su posgrado. Es sabido entre investigadores calificados del propio IMP, que el posgrado empezó con ineficiencias en su ejecución, sin embargo dichas recomendaciones resultan inapropiadas y descalificadas al creer que el IMP no necesita un posgrado. Como se propone en la sección 3.5 del Capítulo III de esta tesis, referente al Modelo de la Cuatro E's, se señala a la educación como un vínculo importante para alcanzar un mayor desarrollo sustentable, sin embargo, tipo de pronunciamientos como los de Bazán y Nava no coinciden con el esquema propuesto aquí. Mientras

¹⁵ Por citar alguno de ellos, el laboratorio de Motoquímica del IMP, que es uno de los más modernos a nivel nacional, ha permanecido cerrado por más de tres años y obviamente sin generar proyectos de investigación en medio ambiente. Probablemente los directivos responsables en generar proyectos de investigación en este sentido permanezcan con los ojos cerrados y creyendo que el medio ambiente no es negocio. Es incoherente asegurar que el medio ambiente no resulta atractivo desde el punto de vista económico, cuando existen graves problemas medio ambientales en el país, y sobre todo con su principal cliente como Pemex.

¹⁶ Datos correspondientes al año 2004.

instituciones de investigación petrolera a nivel internacional [102] apuestan a generar mayor recurso humano calificado por medio del posgrado,¹⁷ Bazán y Nava parece que también presentan una visión miope de corto plazo al sugerir que el IMP no necesita un posgrado.

Por otro lado, el IMP ha publicado su prospectiva de investigación y desarrollo al largo plazo [103], en el cual desarrolló un modelo propio para analizar las plataformas del sector petrolero, en los que se encuentran: exploración y producción; refinación; petroquímica y medio ambiente. En correspondencia con el análisis de la innovación tecnológica, el IMP concluye que él deberá ser un catalizador que promueva el cambio tecnológico en el sector petrolero mediante desarrollo, adaptaciones o asimilaciones de tecnología necesaria para mantener y fortalecer la competitividad del cliente. Además, dice que el desarrollo de tecnología de punta requiere de científicos y tecnólogos del más alto nivel; equipo experimental y de cómputo de punta, así como un ambiente preciso para la innovación tecnológica.

Una opinión del autor, y en base a las conclusiones de innovación tecnológica de la prospectiva del IMP, ésta parece más bien una lista de buenos propósitos los cuales se contradicen con la realidad. Hoy en día el IMP ha presentado un sin número de problemas estructurales: despido de más de 500 empleados, rechazo al apoyo de proyectos de investigación en desarrollo tecnológico de envergadura, continua modificación de los programas de investigación, cierre de laboratorios por falta de visión a corto y mediano plazo, la raquítica inversión económica en investigación avanzada, etc. El IMP ha sido sin lugar a duda un importante contribuidor de investigación petrolera nacional, sin embargo este se encuentra en una etapa decadente debido al incumplimiento de los objetivos que han presentado sus directivos. Además, la política de negocio del IMP se dirige solamente en tener como principal cliente a Pemex, cosa que podría cambiar ya que debería proporcionar sus servicios a otros clientes nacionales e internacionales, así como la creación de empresas tipo Spin-off o joint-venture para fortalecer sus inversiones.

¹⁷ Es el caso de la Escuela Superior del Petróleo y de los Motores (ENSPM) del Instituto Francés del Petróleo (IFP), en donde cada año se aceptan más de 500 estudiantes de los cuales 50% son extranjeros y de los cinco continentes del mundo.

Capítulo VI

Análisis de Exergia del Sector Petrolero Mexicano.

Aquí se presenta el análisis de exergia del sector petrolero en México. La evaluación de cada uno de los parámetros exérgicos corresponden a la metodología desarrollada por Rivero [42]. Cada una de las subsidiarias de Pemex fue evaluada de acuerdo a los datos presentados por las estadísticas anuales y memoria de labores de Pemex correspondientes al año 2004. Es importante por distinguir, que éste es un primer intento por realizar un análisis de exergia del sector petrolero mexicano, por lo que los resultados dependen directamente de las estadísticas que presenta Pemex, así como la Sener. La evaluación resulta compleja debido a la inconsistencia en los datos publicados por Pemex y Sener, principalmente aquellos correspondientes a los balances de materia. En contraste, los resultados presentados en este capítulo podrán establecer un criterio amplio para la identificación las áreas de mejoramiento energético a través del método del análisis de exergia.

6.1 Consideraciones Generales.

Para la evaluación del análisis de exergia del sector petrolero mexicano se debe estudiar inicialmente el Capítulo II de esta tesis.

El análisis de exergia aquí presentado corresponde a un primer esfuerzo por conocer la degradación de la energía en el sector petrolero mexicano. Dicho análisis es el primero en su tipo para Pemex. Anteriormente, Rivero [44,57,60,104] ha realizado ya análisis de exergia para distintas plantas de proceso en complejos petroquímicos y procesos de refinación de petróleo. En dichas evaluaciones se presentan análisis complejos al llevar a cabo simulaciones de procesos y desarrollo de programas de computo avanzados para lograr los objetivos deseados. En contraste, aquí se presenta una evaluación más sencilla al calcular los flujos de materia de cada una de la subsidiarias de Pemex por medio de su exergia química estándar (ϵ^o_q).

Comúnmente la evaluación exérgica de un corriente dada se realiza por medio de su exergia física y su exergia química en conjunto, llamada la exergia total, tal como:

$$EX_{tot} = EX_f + EX_q \quad (6.1)$$

La exergia total está definida como el trabajo máximo (energía útil) que puede ser obtenida de ésta al considerarlo en completo equilibrio (de temperatura, presión y composición) con el medio ambiente.

La exergia física está definida por:

$$EX_f = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \Big|_{X \text{ constante}} \quad (6.2)$$

Mientras la exergia química por:

$$EX_q = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \Big|_{T, P \text{ constantes}} \quad (6.3)$$

donde la entalpia H y la entropia S tienen que ser evaluadas por la composición química de la sustancia (X) y por la composición del medio ambiente (X_0). La entalpia y la entropia para la composición de las corrientes y el medio ambiente son evaluadas a la misma temperatura y presión, normalmente a las condiciones medioambientales (T_0, P_0).

Como se mencionó en párrafos anteriores, la evaluación del análisis de exergia aquí presentado se realizó calculando las exergias químicas estándar de cada una de los productos (corrientes) que se producen y elaboran en Pemex. Para ello, se siguió la definición hecha por Szargut y Styrylska [105] en relación al cálculo de

la exergia química estándar de combustibles sólidos y líquidos industriales. Ellos asumen que la relación entre la exergia química estándar (ϵ^0_q) y el poder calorífico neto (PCN) para combustibles sólidos y líquidos industriales es el mismo como para sustancias químicas puras teniendo la misma relación de componentes químicos. Esta relación está dada por:

$$\varphi = \frac{\epsilon^0}{(\text{PCN})^0} \quad (6.4)$$

La exergia química estándar para muchas sustancias están reportadas en la literatura [29], sin embargo existen fórmulas heurísticas que permiten calcular la exergia química de sustancias en función de su composición elemental y el poder calorífico de cada pseudo componente. La expresión para su cálculo está determinado por la siguiente ecuación:

$$\epsilon^0_q = (\text{PCN})_i \varphi_i + \sum z_i \epsilon_{qi} \quad (6.5)$$

Aquí, para lograr el propósito del cálculo de ϵ^0_q de hidrocarburos y petroquímicos, se determinó el factor φ como una función de la composición (fracción masa) de C, H, O, N y S por medio de:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C} \right) + 0.0428 \frac{N}{C} \quad (6.6)$$

Como resultado, la Tabla 6.1 presenta los valores de ϵ^0_q de distintos hidrocarburos y petroquímicos que se producen en Pemex. La mayoría de los valores presentados se obtuvieron de la literatura [29] y los restantes se determinaron manualmente con el uso de las ecuaciones 6.5 y 6.6.

Por ejemplo, el valor de ϵ^0_q del crudo Maya se encuentra en la literatura [106], por lo que el valor de φ se determina de acuerdo a la ecuación 6.4. Otro ejemplo es el valor de ϵ^0_q del Acrilonitrilo (C_5H_3N), el cual se determinó utilizando la ecuación 6.6 y 6.5, así como el cálculo de su PCN por medio de:

$$\text{PCN} = 34.8 C + 93.8 H + 10.46 S + 6.28 N - 10.8 O \quad [\text{MJ}/\text{kg}] \quad (6.7)$$

donde C, H, O, N y S corresponden a su composición en fracción masa.

De esta manera se determinó la exergia química de los productos petrolíferos y petroquímicos que produce y elabora Pemex en cada una de sus subsidiarias, así como la exergia química de las emisiones de gases efecto invernadero como son CO_2 , SO_x y NO_x .

Especie	Poder calorífico neto (PCN) (kJ/kg)	Exergia química estándar (ϵ°) (kJe/kg)	ψ (ϵ° / PCN)
Crudo Maya	41,671.36	44,210.00	1.0609
Crudo Istmo	42,610.72	45,290.00	1.0629
Crudo Olmeca	42,872.57	45,615.00	1.0640
Condensados ^a	4,519.00	4,794.66	1.0610
Gasolina	43,497.67	46,650.00	1.0725
Diesel	41,868.00	45,650.00	1.0903
Turbosina	42,800.00	46,175.00	1.0789
Combustóleo	40,122.10	43,800.00	1.0917
Coque de petróleo	30,675.00	32,208.75	1.0500
Azufre ^b	8,831.00	19,002.62	2.1518
Nafta	43,497.67	46,650.00	1.0725
Gas LP	46,054.80	49,370.75	1.0720
Gas seco	34,352.70	35,898.57	1.0450
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
Negro de humo	41,592.75	43,672.34	1.0500
Amoniaco	18,628.78	19,841.46	1.0651
Metanol	19,955.11	22,408.09	1.1229
Acetaldehido	25,095.80	26,510.94	1.0564
Cloruro de vinilo	16,860.00	17,901.95	1.0618
Dicloetano	12,267.37	13,113.82	1.0690
Etileno	47,228.80	48,520.60	1.0274
Polietileno	43,400.00	46,398.94	1.0691
Oxido de etileno	27,706.57	29,156.45	1.0523
Benceno	40,189.71	42,292.03	1.0523
Estireno	40,557.70	42,772.15	1.0546
Etilbenceno	40,974.60	43,216.84	1.0547
(o-p-m)-Xileno	40,860.47	43,238.55	1.0582
Tolueno	40,574.00	43,231.16	1.0582
Propileno	45,411.67	48,549.62	1.0691
Ácido clorhídrico ^b	3,002.93	2,357.31	0.7850
Hidrógeno	120,044.77	117,128.83	0.9757
Acetonitrilo	29,414.86	31,232.70	1.0618
Ácido cianhídrico	22,386.97	23,607.06	1.0545
Acilonitrilo	31,932.10	33,487.19	1.0487

a. Unidades en MJ/bl y MJe/bl.

b. Unidades en MJ/ton y MJe/ton.

Tabla 6.1 Poder calorífico y exergia química estándar de algunos hidrocarburos y petroquímicos.

Una vez conocidos los valores de exergias químicas de cada una de las especies, se utilizó la información pública que presenta Pemex en sus Reportes Anuales [89], Memorias de Labores [93] e Informes de Desarrollo Sustentable [107], así como la información publicada por la Sener [108], para establecer un balance de materia ah-doc y así conocer cada uno de los flujos de materia de Pemex para el año 2004. Desafortunadamente, los datos presentados por ambas instituciones son inconsistentes y se recurrió a usar el pensamiento y cálculo heurístico para lograr identificar el flujo de las corrientes de algunos de los hidrocarburos, petroquímicos y emisiones que produce Pemex.¹ Es importante señalar que en el balance de materia no se contemplan las importaciones de hidrocarburos y petroquímicos que negocia Pemex; aquí se considera solamente la producción neta de petróleo crudo, condensados, gas natural asociado, gas natural no asociado y otros.

Una vez conformado el balance de materia general, se elaboró el balance de energía y el balance de exergia. Seguidamente, se determinaron los parámetro exérgicos utilizando la metodología presentada en el Capítulo II y desarrollada por Rivero [42].

6.2 Análisis de Exergia de Pemex: PEP, PR, GGPB y PPQ.

Aquí se presentan los análisis de exergia de las subsidiarias de Pemex. Se comienza con una breve descripción de los balances generales de los productos de cada subsidiaria para el año 2004. Seguidamente, se presentan los resultados de los parámetros exérgicos, como son: Exergia de efluentes (Ex_{fl}), Irreversibilidades (Irr), Pérdidas de exergia (Pex), Exergia neta total suministrada (Ex_{nts}), Exergia neta total producida (Ex_{ntp}), Efectividad exérgica (ϵ), y Potencial de mejoramiento (Pot). Adicionalmente, se presentan los diagramas de Grassmann de balance exérgico para identificar de manera gráfica y práctica los flujos de exergia de cada subsidiaria.

6.2.1 Análisis de exergia de Pemex Exploración y Producción – PEP.

La producción de PEP se lleva a cabo en cuatro regiones (sur, norte, marina noreste y marina suroeste). Al cierre de 2004, PEP presentó una producción de 3,385 mmbd de petróleo crudo, en donde 72.6% fue de crudo Maya, 23.3% de crudo Istmo y 3.9% de crudo Olmeca. Desafortunadamente, el 55% de la producción de crudo por parte de PEP se exporta, siendo el crudo

¹ En este sentido, es necesario proponer acciones para lograr que la información sea más concisa, ya que existen paradigmas en el manejo de la información publicada por parte de Pemex y Sener.

Maya el que ocupa el mayor volumen de exportación (85.9%). Otros productos de PEP son el gas natural asociado y el gas natural no asociado, en donde reportó una producción de 3,010 mmpcd y 1,563 mmpcd, respectivamente. Adicionalmente, PEP recibe gas natural de PGPB, el cual contribuyó con aproximadamente 1,169 mmpcd. En consecuencia, la suma total de la producción de PEP, más su autoconsumo de energía, representa una entrada total de exergía a la subsidiaria de 354,901 MWe.

PEP distribuye y vende sus productos a las otras subsidiarias (PR, PGPB y PPQ)². Distribuyó 1,392 mmbd de crudo³ y 5,742 mmpcd de gas natural. El gas natural lo envió mayoritariamente a PGPB, considerándose el 83.1% de dicha distribución. Además, dentro de sus productos, distribuyó condensados por 46.6 mbd. Por otro lado, PEP produjo emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, entre las que se encuentran principalmente el CO₂, SO_x y NO_x. PEP registró un flujo de emisiones de 10.03 mm ton de CO₂, 61.72 mton de SO_x y 49.53 mton de NO_x. Asimismo, reportó emisiones por concepto de derrames y fugas en el orden de 3.73 mb, además de quema y desfogue por aproximadamente 10 mmbpce.

De aquí, la suma de la distribución y venta, y las emisiones de PEP, representan un flujo de exergía total a la salida de 310,082 MWe.

Con la evaluación exérgica de cada una de las corrientes antes mencionadas, se determinaron los parámetro exérgicos para PEP, los cuales aparecen reportados en la Tabla 6.2.

De acuerdo con la metodología desarrollada por Rivero, el potencial de mejoramiento exérgico (Pot) es una medida de cuánto y con qué facilidad podría ser mejorado un sistema para los propósitos de optimización. Para tal efecto, y en relación a la ecuación 2.36 del Capítulo II, si la efectividad es muy baja, entonces el potencial relativo (1 - ε) aprovecha su valor máximo, de tal manera que el sistema debería en principio poder ser mejorado con facilidad. Este razonamiento, y en congruencia con los resultados de la Tabla 6.2, permitiría establecer que el potencial para optimizar PEP desde el punto de vista energético es alto, debido a la baja efectividad que desarrolla.

	Irr _{PEP} (MWe)	Ex _{flPEP} (MWe)	Pex (MWe)	Efectividad	Pot (MWe)
PEP	44,819.00	5,873.24	50,629.24	0.082	50,655.49

Tabla 6.2 Parámetros exérgicos para Pemex Exploración y Producción (PEP).

² Además, se debe considerar a Pemex Internacional (PMI) como la subsidiaria del comercio exterior de Pemex.

³ 90.3% se distribuyó a PR y el 9.6% a PPQ (para despunte en el Centro PPQ “La Cangrejera”).

En otro orden de ideas, se entiende que PEP no logra el efecto deseado y sostenido debido a la gran cantidad de exergía desaprovechada (o derrochada) por concepto de alto consumo energético, desfogue y quema, y sobre todo por exportación de petróleo crudo.

Desde el punto de vista operativo, una plataforma marina de producción puede presentar una baja eficiencia exérgica debido al alto consumo de energía para calentamiento y acondicionamiento de crudo, así como la energía consumida para la compresión y transporte de gas [46]. En suma, se puede entender que PEP requeriría ser optimizado en los equipos de combustión y áreas de fuerza de las plataformas, así como el aprovechamiento de la energía emitida por el desfogue y quema de hidrocarburos.

Por otro lado, la política de continuar con el alto volumen de exportación de petróleo crudo, desemboca en la idea de desaprovechar la exergía contenida en el crudo para producir o elaborar productos con mayor valor agregado. La exergía permitiría distinguir la calidad de los productos petrolíferos y determinaría el valor económico de cada uno de ellos.

Para entender cómo se distribuye y degradan las corrientes exérgicas de PEP, se elaboró un diagrama de Grassmann de balance de exergía, el cual se presenta en la Figura 6.1. Como se observa en la figura, una cantidad importante de exergía se presenta por la exportación de crudo (Ex_{export}), teniendo una contribución del 40.9%. Seguidamente, la exergía por efecto de las irreversibilidades (Irr_{PEP}) representan el 12.6%. Finalmente los efluentes de exergía (Ex_{flPEP}) contribuyen con el 1.65%.

La exergía de productos a proceso como son la exergía de salida del gas natural (Ex_{salGN}) y la exergía de salida de PEP (Ex_{salPEP}) contribuyen con el 15.5% y 28.5% respectivamente.

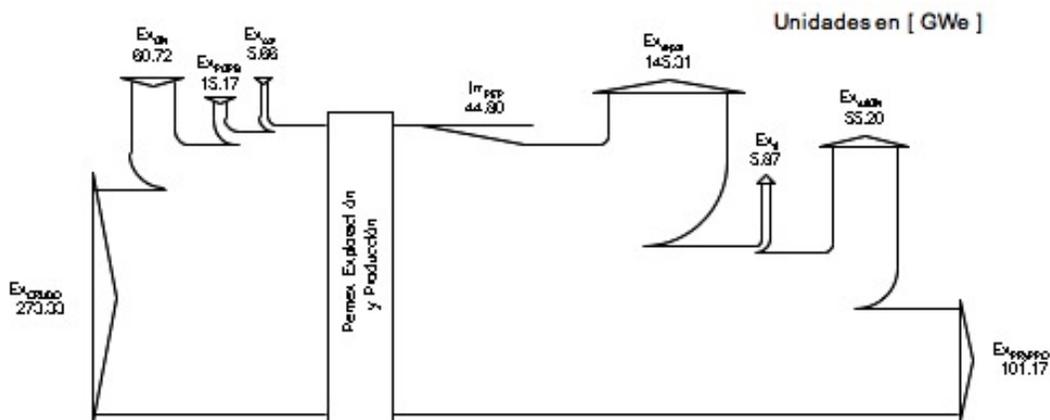


Figura 6.1 Balance de exergía de Pemex Exploración y Producción (PEP).

6.2.2 Análisis de exergia de Pemex Refinación – PR.

PR recibe la mezcla de petróleo crudo de PEP. En el año 2004 recibió una mezcla 0.39 : 0.60 : 0.002 de crudo Maya, Istmo y Olmeca, respectivamente. El crudo es distribuido a las seis refinerías que conforman el Sistema Nacional de Refinación (SNR), y en ese mismo año tuvo un flujo de 1,303 mbd. Además, una fracción de crudo es enviado al Centro PPQ “La Cangrejera” para el despuntado del mismo, y posteriormente es reenviado al SNR.⁴ En consecuencia, la cantidad de exergia total a la entrada de PR corresponde a 102,728 MWe.

Entre los principales productos que elabora PR son: gas licuado, gas seco, gasolinas, turbosina, diesel, querosenos, combustóleo, coque de petróleo, parafinas, grasas, lubricantes y petroquímicos. El total de petrolíferos que elaboró PR fue de 1,361 mbd, así como 1,043 mbd de petroquímicos al cierre de 2004. De estos datos, se calculó que la exergia total a la salida de PR es de 96,117 MWe.

Una vez conocidos los volúmenes de crudo procesado y productos petrolíferos elaborados, se procedió a realizar el análisis de exergia. Los resultados de los parámetros exérgicos para PR aparecen reportados en la Tabla 6.3

Considerando una exergia total a la entrada de PR arriba mencionado, 6.4% corresponden a las pérdidas irreversibles de exergia (Irr_{PR}). Este resultado, ciertamente, podría considerarse muy bajo en comparación con los resultados presentados en posteriores análisis [109],⁵ sin embargo, no se escatima su confiabilidad debido a que aquí solamente se considera el valor de la exergia química de los hidrocarburos. La interpretación de dichos resultados, inciden en el hecho de identificar el comportamiento de este sector.

Los efluentes de exergia están representados por la suma de las corrientes de emisiones (CO_2 , SO_x y NO_x), derrames, fugas, quema y desfogue, por lo que representan el 5% de las pérdidas totales y 0.33% respecto a la exergia total a la entrada.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 6.3, PR tendría un potencial de mejoramiento de 5.7% respecto de la exergia de entrada. Considerando la experiencia de análisis posteriores [109], el mayor porcentaje de mejoramiento se identifica en las plantas combinadas, catalíticas e hidrosulfuradoras de gasóleos, por lo que las acciones de optimización deberían dirigirse fundamentalmente a dichas plantas.

⁴ El volumen de crudo procesado en el Centro PPQ “La Cangrejera” fue de 134 mbd (crudo pesado) en el año 2004. De éste, se elaboró 85.8% de despuntado y 14.2% de nafta.

⁵ Los análisis de exergia de la refinería de Cadereyta y Madero han sido ya realizados, cuyos resultados se muestran en el Apéndice D. Adicionalmente, aquí se han pronosticado los valores de los parámetros exérgicos de cada una de las refinerías de acuerdo a su capacidad de producción del año 2004.

Por otro lado, y como ya se mencionó, otra forma de identificar el flujo de exergia es por medio del Diagrama de Grassmann, el cual se presenta en la Figura 6.2.

	I_{irrPR} (MWe)	Ex_{fPR} (MWe)	P_{ex} (MWe)	Efectividad	Pot (MWe)
PR	6,610.81	347.63	6,958.45	0.1603	5,898.85

Tabla 6.3 Parámetros exérgicos para Pemex Refinación (PR).

Observando dicha figura, la mayor cantidad de exergia a la salida corresponde los productos petrolíferos a distribución. Dichos petrolíferos están representados por la mayoritaria cantidad de exergia producida de gasolinas, diesel y combustóleo. De ellos, el que presenta un mayor valor de exergia son las gasolinas. En este contexto, la política debería dirigirse a desarrollar proyectos de inversión para la instalación de nuevas plantas y elaborar productos con mayor calidad energética (exergia).

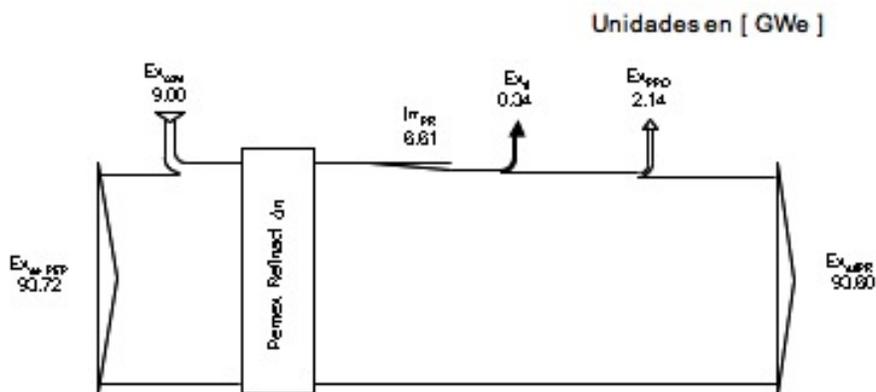


Figura 6.2 Balance de exergia para Pemex Refinación (PR).

Finalmente, otro flujo de exergia es enviado a PPQ para la elaboración de productos petroquímicos. De aquí, aproximadamente 2 GWe corresponden al envío de Nafta.

6.2.3 Análisis de exergia de Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB).

Para la producción de gas natural y petroquímicos básicos, PGPB recibe gas húmedo (amargo y dulce) de PEP. En 2004 recibió un total de 3,963 mmpcd. Además, recibió 107 mbd de condensados por parte de la misma subsidiaria. Otro flujo a la entrada correspondió a productos provenientes de PPQ;

principalmente hidrógeno, metanol y líquidos BTX. A partir de estos flujos, más la energía de consumo, la cantidad de exergia total a la entrada en PGPB correspondió a 62,210 MWe.

Los productos que elabora PGPB son principalmente gas seco, líquidos del gas, gas licuado, etano, gasolinas naturales y azufre. El mayor porcentaje de la producción correspondió al gas seco, representando un volumen de 3,144 mmpcd. Seguidamente la producción de gas licuado participó con 348 mbd.

En lo que respecta a emisiones, PGPB reportó emisiones de gases en el orden de 6.12 mm ton de CO₂, 34.48 mton de SO_x y 9.24 mton de NO_x. Otras emisiones como derrames y fugas, así como quema y desfogue fueron reportadas; 36.3 mb/año y 0.15 mmbpce, respectivamente.

Una vez conformado el balance de materia, se realizó el análisis de exergia para PGPB. De aquí, los resultados de los parámetros exérgicos se presentan en la Tabla 6.4.

De acuerdo a los resultados reportados, el efecto de las irreversibilidades tienen una importante contribución al potencial de mejoramiento, debido a que el potencial relativo tiene un máximo, es decir, la baja efectividad indica la facilidad de mejorar los procesos en PGPB. Una oportunidad de mejoramiento podría centrarse en la optimización de los equipos de compresión de gas y procesos de separación para la producción de petroquímicos.

	Irr_{PGPB} (MWe)	Ex_{HPGPB} (MWe)	Pex (MWe)	Efectividad	Pot (MWe)
PGPB	2,917.86	175.00	3,092.85	0.05	2,947.22

Tabla 6.4 Parámetros exérgicos para Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB).

En relación a emisiones, la máxima contribución en los efluentes de exergia se debió por la emisión de CO₂. Aproximadamente el 50% corresponden a dicho gas.

Como se puede observar en la Figura 6.3, casi toda la producción de exergia es representada por la distribución de gas natural y petroquímicos básicos. Una fracción de gas natural seco, etano y hexano son enviados a PPQ.

Dentro de la exergia que va a distribución, cabe mencionar que el 28.2% corresponde al envío de gas natural a PEP. Asimismo, otra fracción importante de exergia se distribuye al sector industrial y sector eléctrico por el envío de gas natural. Desafortunadamente, para cubrir la demanda de gas natural se recurre a

la importación de dicho energético, por lo que se traduce en comprar un combustible con alto valor exérgico.

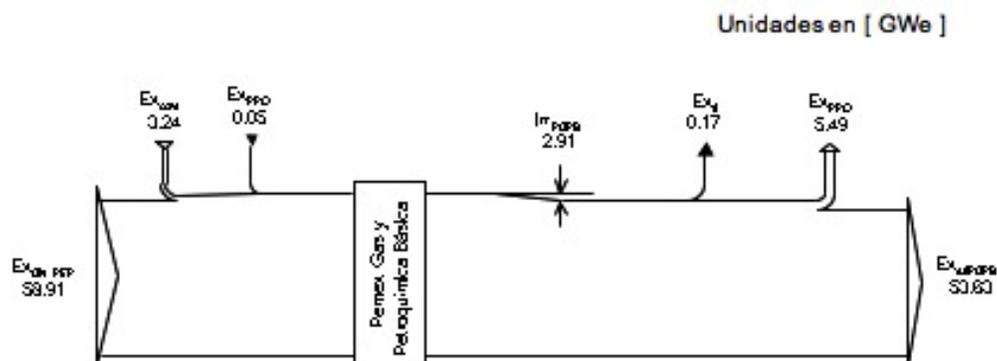


Figura 6.3 Balance de exergia para Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB).

Es de esta manera como se puede identificar de manera cuantitativa la eficiencia de los procesos para la producción de gas y petroquímicos básico. No se debe perder de vista, que para obtener resultados más precisos, es necesario la evaluación de los parámetros energéticos conteniendo la exergia física de cada uno de los procesos.

6.2.4 Análisis de exergia de Pemex Petroquímica (PPQ).

PPQ recibe hidrocarburos de otras subsidiarias. Es el caso de PEP, que distribuye crudo pesado al Centro PPQ “La Cangrejera” para el despunte del mismo. Adicionalmente, PPQ recibe naftas y propileno de PR, así como gas seco, etano y hexano de PGPB. De este último, el gas natural es el mayor portador (en volumen) de materia prima para PPQ, el cual fue de 3,049 mnton a final de 2004. Con esta cantidad de volumen a la entrada, más el consumo de energía, PPQ presenta una exergia total a la entrada de 21,368 MWe.

La producción de petroquímicos está dividida en cuatro rubros: derivados del metano, derivados del etano, aromáticos y derivados, y propileno y derivados.⁶ Dentro de estos cuatro rubros, se destaca la producción de etileno como el producto con el mayor volumen (16%) de elaboración por parte de PPQ; le siguen el anhídrido carbónico y el amoniaco. En el 2004, PPQ elaboró 6,223 mton de productos petroquímicos, donde aproximadamente el 33% corresponde a la elaboración de productos derivados del etano.

⁶ Existe adicionalmente una clasificación, la cual PPQ la nombra como “otros”. En estos, los productos elaborados que se distinguen son: oxígeno, líquidos de BTX, hidrógeno, nitrógeno, hexano, gas nafta, ácido clorhídrico, butadieno, hexano, heptano e isohexano.

Por otro lado, las emisiones de PPQ correspondieron a 6.15 mton de CO₂, 3.35 mton de SO_x, 7.2 mton de NO_x, 36.3 mb por derrames y fugas, y 0.11 mmbpce por desfogue y quema de hidrocarburos.

Como resultado del análisis desarrollado a PPQ, los parámetros exérgicos que se calcularon aparecen reportados en la Tabla 6.5. En este caso en particular, se encontró que la efectividad exérgica es superior a las otras subsidiarias. En consecuencia, se traduce que el potencial relativo influye en menor proporción al mejoramiento de las irreversibilidades (Irr_{PPQ}) al interior de los complejos petroquímicos. Adicionalmente, la influencia de los efluentes de exergia (EX_{flPPQ}) representan el 4.6% del potencial de mejoramiento, y aunque no parezca representativo, aproximadamente el 54% de los efluentes están representados por la emisión de CO₂.

	Irr _{PPQ} (MWe)	EX _{flPPQ} (MWe)	Pex (MWe)	Efectividad	Pot (MWe)
PPQ	4,573.21	163.43	4,735.64	0.2658	3,520.03

Tabla 6.5 Parámetros exérgicos para Pemex Petroquímica (PPQ).

Tomando la experiencia de anteriores resultados sobre el análisis de exergia en plantas petroquímicas [110], la mayor parte de pérdidas de exergia se generan en las reacciones exotérmicas de los procesos y en los servicios de calentamiento y generación de vapor. Por ejemplo, para el caso de la producción de etileno, y partir de su análisis de exergia, se podrían establecer nuevos caminos para llevar a cabo programas de investigación y desarrollo tecnológico para abatir las pérdidas de exergia y así optimizar el proceso.⁷

Un caso en particular, son las unidades de destilación. La destilación es la tecnología más utilizada y contribuye a una significativa porción de las pérdidas de exergia. La mayoría de las pérdidas de exergia externa ocurren en los condensadores, los cuales usualmente emplean agua de enfriamiento o aire. Una solución para optimizar los procesos en la industria petroquímica, sería instalar

⁷ En Pemex Petroquímica, podrían existir un amplio campo de oportunidades debido al alto volumen en la producción de etileno y la intensidad energética del mismo. El craqueo térmico resulta en una amplia mezcla de producto reactivo que requiere de la intensidad energética de apagado y complejos procesos de separación. Para ello, la reducción de la intensidad energética se establecería a partir de su análisis de exergia y se establecerían las áreas de I&D, como por ejemplo: a) establecer nuevos conceptos de separación (sistemas híbridos) acoplados con nuevas vías para producir etileno, o, b) determinar nuevas rutas para la base de etileno sobre la alternativa de materias primas (etanol, metanol, metano/syngas, oleofinas pesadas), acoplados con tecnologías de recuperación simple y purificación. (Información tomada del reporte del Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDoE) sobre el Análisis de Exergia de Procesos Petroquímicos).

tecnología que reduzca las pérdidas de exergía como es el caso de la destilación diabática [42,57,61,104,111].

La representación gráfica de los flujos de exergía para PPQ están asentados en la Figura 6.4. Como se observa en la figura, el mayor aportados de exergía es la proveniente de PEP y seguido de PGPB. PR contribuye con el 10% del total. La exergía consumida (Ex_{cons}), se identifica como la energía (en calidad) que es para autoconsumo.

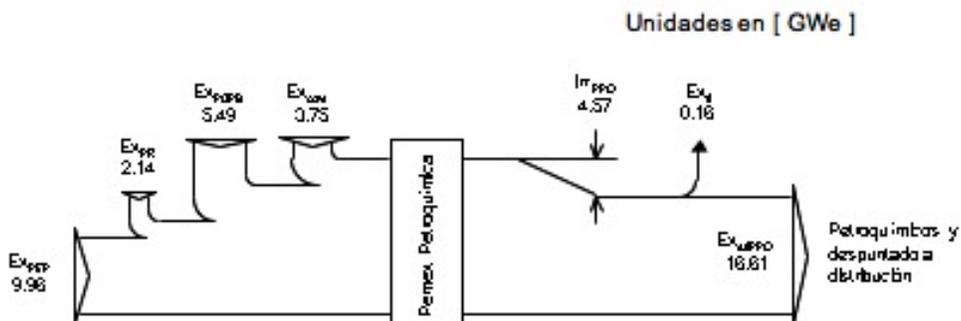


Figura 6.4 Balance de exergía para Pemex Petroquímica (PPQ).

Finalmente, la exergía a la salida de PPQ (Ex_{salPPQ}) se conforma por los petroquímicos elaborados y el crudo despuntado. De este último, más de 10.1 MWe son considerados del despuntado y nafta, provenientes del Centro PPQ “La Cangrejera”. En relación a los productos petroquímicos, el etileno es el mayor portador de exergía, del cual se consideraron aproximadamente 1.54 MWe.

6.3 Análisis de Exergía General de Pemex.

En esta sección se presenta, en resumen, el análisis de exergía de Pemex. Aquí, se consideran los análisis precedentes de cada una de las subsidiarias de Pemex y se muestra su diagrama general del balance de exergía.

De acuerdo a cada uno de los parámetros exérgicos calculados a las subsidiarias de Pemex, se distingue que PEP presenta el mayor porcentaje en cada uno de dichos parámetros. Por ejemplo, el potencial de mejoramiento exérgico (Pot) de PEP contribuye con el 83.8% del potencial de mejoramiento general de Pemex. Esto significa que se debería atacar preferentemente el potencial de mejoramiento de PEP para propósitos de optimización y establecer nuevos programas de

investigación y desarrollo tecnológico y políticas energéticas efectivas que contribuyan al verdadero mejoramiento de Pemex.

Para el caso de PEP, se podrían considerar varias alternativas de mejoramiento, como por ejemplo: a) aprovechar en mayor proporción el combustible quemado en los equipos de desfogue de las plataformas marinas para la producción de hidrógeno (o gas de síntesis, syngas) por medio de procesos de gasificación integrada; b) optimizar los equipos de calentamiento que preceden a la separación de crudo; c) uso adecuado de los niveles de temperatura para la separación; d) uso de nuevas tecnologías de separación (destilación diabática o separación centrifuga) como una medida para incrementar el rendimiento exergético de los procesos; e) establecer una política energética internacional adecuada para reducir las exportaciones de petróleo crudo para elaborar un mayor volumen de combustibles y petroquímicos que contienen un mayor valor agregado; entre muchas más.

Este tipo de propuestas (y si se considerarían más específicas) pueden generarse por medio de un análisis de exergia, ya que a partir de la obtención de los parámetros exérgicos se podrían plantear soluciones de mejoramiento a cada uno de los niveles de los procesos de transformación de la industria petrolera. Se pueden mejorar los aspectos energéticos, económicos, ecológicos y sociales de cada una de las subsidiarias al disminuir las pérdidas irreversibles de exergia en cada uno de los procesos.

En consecuencia, los resultados de los parámetros exérgicos de Pemex aparecen reportados en la Tabla 6.6 para identificar el comportamiento de cada una de las subsidiarias y establecer el balance general del flujo de exergia a partir de cada una de ellas. Adicionalmente, en la Figura 6.5 se presenta el diagrama general del balance de exergia de Pemex, y de acuerdo al análisis desarrollado aquí, es el primero publicado en su tipo. En referencia, sería adecuado plantear nuevas investigaciones para establecer programas de trabajo para el desarrollo de análisis de exergia a cada una de las subsidiarias de Pemex, basados en cálculos más rigurosos y uso de programas de cómputo sofisticados para lograr las metas propuestas. Aunque ya se han realizado proyectos para la optimización de plantas de proceso en algunas subsidiarias de Pemex [112,113,114], no se deberían escatimar esfuerzos para continuar con este tipo de proyectos, ya que una gran parte del crecimiento energético-económico y mejoramiento ambiental están fundamentados por la optimización de los procesos al abatir las pérdidas irreversibles de exergia.

De la Tabla 6.6 se distingue que se presentan los resultados de los parámetros exérgicos de exergia neta total suministrada (EX_{nts}) y exergia neta total producida (EX_{ntp}). Como se menciona en el Capítulo II, ecuación 2.29, la EX_{nts} es la diferencia de los depósitos de exergia (fuente/depósito) y la EX_{ntp} es la diferencia entre los

donadores de exergía (donador/receptor). Estos dos parámetros representan la cantidad de exergía que es consumida para lograr el efecto deseado a los productos, así como la ganancia de exergía de los mismos. Por ejemplo, para el caso de PR, el valor de Ex_{nts} corresponde a la diferencia entre el consumo de energía y las emisiones de gases para lograr la transformación del crudo a productos petrolíferos, y el valor de la Ex_{ntp} es la ganancia de exergía por medio de la diferencia en la suma de la exergía de los productos y la suma de la exergía de las materia prima. Con el cálculo de estos dos parámetros, se pudo determinar la efectividad de cada una de las subsidiarias, de acuerdo a la ecuación 2.35 del Capítulo II.

Parámetro exérgico	PEP	PR	PGPB	PPQ	Total Pemex
Irr (MWe)	44,819.00	6,610.81	2,917.86	4,573.21	58,920.88
Exfl (MWe)	5,873.24	347.63	175.00	162.43	6,558.30
Pex (MWe)	50,692.24	6,958.45	3,092.85	4,735.64	65,479.19
Exnts (MWe)	339,575.46	8,296.57	3,071.13	3,671.00	354,614.17
Exntp (MWe)	27,844.23	1,329.80	153.28	975.80	30,303.10
Efectividad	0.082	0.1603	0.0499	0.2658	0.0855
Pot (MWe)	50,655.49	5,898.85	2,947.22	3,520.03	60,444.18

Tabla 6.6 Parámetros exérgicos generales para Pemex.

En correspondencia a los resultados de la Tabla 6.6, Pemex presenta una baja efectividad exérgica (ϵ), es decir, Pemex no cumple adecuadamente su función para efectuar los objetivos destinados por la empresa. Esto se debería entender desde el punto de vista termodinámico de los procesos, sin embargo desemboca en otros aspectos como administrativos, financieros y sociales de la empresa.

Por otro lado, como se observa en la Figura 6.5, una gran cantidad de exergía es desaprovechada por la exportación de crudo. Es cierto que las exportaciones permiten tener ingresos económicos elevados en el país, sin embargo no resulta efectivo desde el punto de vista exérgico, ya que con la transformación de ese crudo exportado se podrían generar mayores ingresos al país por la venta de productos con mayor exergía (calidad energética) y no depender de las importaciones de productos con mayor valor agregado. En otras palabras, es incongruente establecer que si se cuenta con el recurso energético como es el petróleo, se tenga que comprar combustibles con altos precios si se pueden generar en el propio país a partir de él.

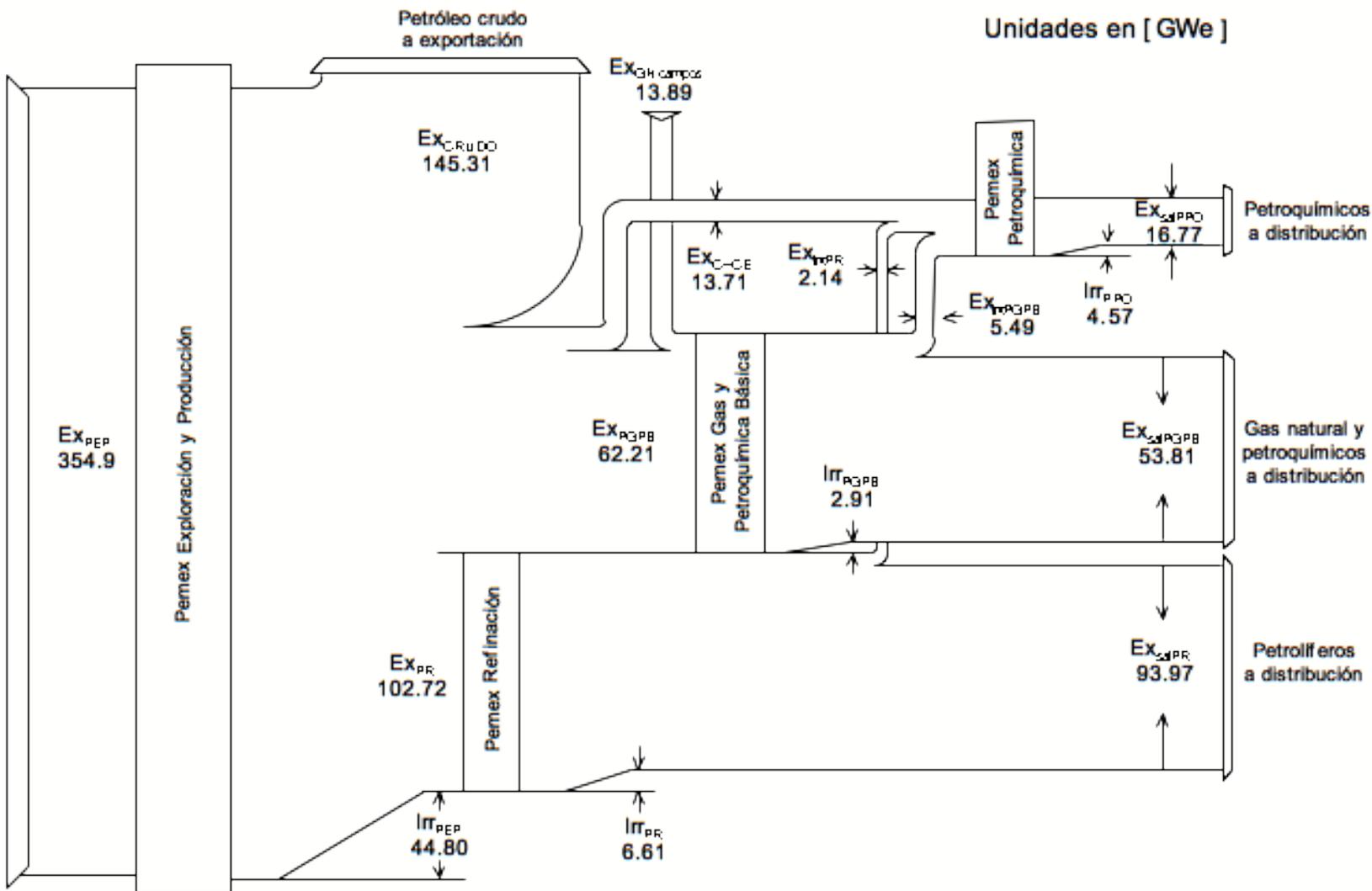


Figura 6.5 Balance de exergia del Sector Petrolero Mexicano.

Adicionalmente, en la Figura 6.5 se distinguen los flujos de exergia que se envían a otras subsidiarias, así como las pérdidas irreversibles de exergia en cada una de ellas. Se debe considerar que para este análisis no se consideraron los flujos de exergia de importaciones de combustibles y petroquímicos, por lo tanto, sólo se presenta la exergia producida y no como la oferta nacional de exergia. A tal hecho, se propone que en futuras investigaciones, se establezcan todas y cada una de las importaciones del sector petrolero mexicano.

En suma, se establece que la eficiencia exérgica de Pemex es aproximadamente de 44%; este parámetro se determinó por la relación de la exergia de los productos petroquímicos e hidrocarburos elaborados (que son distribuidos para oferta interna), y la exergia total a la entrada en el sector.

Como ejercicio de comparación, se determinó la eficiencia energética del Sector Petrolero de acuerdo con el Balance Nacional de Energía que publica Sener para el año 2004 [108] (pero que en realidad corresponden al año 2003), el cual resultó en el orden de 53% de eficiencia (no se consideró salida de energía por concepto de exportación de petróleo). Adicionalmente, se identificó, y de acuerdo con Sener, que en el balance de energía para este sector existe una inconsistencia por la entrada total y salida total de energía. Para este en particular, Sener publica una entrada de energía de 10,083.429 PJ y una salida de 9,271.502 PJ: ¿dónde están los 811.927 PJ restantes?. Por el contrario, con el Balance de Exergia, la diferencia se justifica por las pérdidas irreversibles de exergia, las cuales son contabilizadas para calcular el potencial de mejoramiento de dicho sector, razón que no sucede con el Balance de Energía según Sener.

Capítulo VII

Indicadores de Sustentabilidad Exérgica.

Aquí se presenta la definición y análisis de resultados de los Indicadores de Sustentabilidad Exérgica (ISEx) del sector petrolero mexicano. A partir de un análisis de exergía, desarrollado al sector petrolero mexicano, se pueden calcular indicadores que califiquen la sustentabilidad de dicho sector en tres importantes aspectos: energético, económico y ecológico. Se diseñaron un total de 9 indicadores, los cuales están fundamentados por el concepto de exergía. Tres indicadores se tomaron de la base metodológica del estudio de OLADE/CEPAL/GTZ y los restantes son una nueva propuesta aquí presentada. Debe considerarse que los indicadores desarrollados son una propuesta inicial, por lo tanto podrían contribuir para la generación de investigaciones más rigurosas.

7.1 Definición de los Indicadores de Sustentabilidad Exérgica.

Para el desarrollo de Indicadores de Sustentabilidad Exérgica (ISEx), inicialmente debe elaborarse un análisis de exergía del sistema a calificar. En este sentido, y como parte de los objetivos de esta tesis, en el capítulo anterior se presenta el análisis de exergía del sector petrolero mexicano.

Como se presenta en el Capítulo IV, los indicadores son una calificación del comportamiento de un sistema. Existen diversos indicadores ya propuestos por distintos organismos internacionales, por lo que la base metodológica aquí presentada, se apoya a partir de los trabajos realizados de alguno de ellos. La metodología utilizada es la propuesta por OLADE/CEPAL/GTZ [86].

Algunos de los indicadores propuestos por OLADE/CEPAL/GTZ fueron utilizados aquí, sin embargo, se hizo la distinción por estar justificados por el concepto de exergía. Por ejemplo, el indicador de autarquía energética, fue definido como autarquía exérgica.

Para distinguir a cada uno de los indicadores del sector petrolero mexicano, se identificaron en tres dimensiones, siendo estos: dimensión económica, dimensión ecológica y dimensión energética. A continuación se listan los indicadores desarrollados aquí de acuerdo a su dimensión:

- a) Dimensión económica.
 1. Autarquía exérgica.
 2. Intensidad exérgica.
 3. Fortalecimiento de la calidad energética.

- b) Dimensión ecológica.
 4. Pureza de uso exérgico.
 5. Intensidad exérgica de CO₂.
 6. Pérdida de exergía vinculada a productos.

- c) Dimensión energética.
 7. Consumo exérgico.
 8. Uso efectivo de calidad energética.
 9. Mejoramiento germinal.

7.1.1 Dimensión económica.

Desde el punto de vista del nivel sectorial, el desempeño del sector energético es crucial en la economía, sobre todo por la necesidad de la calidad y confiabilidad del suministro energético. Es por ello que aquí, la distinción sobre el concepto de exergía se hace latente al identificar la calidad energética de los productos elaborados en la cadena del sector petrolero.

Inicialmente, la *autarquía exérgica* es el porcentaje de las importaciones de exergía en la oferta exérgica. Este indicador representa la dependencia de la economía del sector petrolero respecto a los cambios en los factores externos. Además, indica la fragilidad de la sustentabilidad económica de las compañías petroleras importadoras de exergía, al mostrar que con el incremento del porcentaje de las importaciones en la oferta exérgica aumenta la vulnerabilidad de su economía respecto a los aspectos internacionales, bélicos o geopolíticos. Adicionalmente, la autarquía exérgica se puede entender como la satisfacción de las necesidades exérgicas mediante las fuentes internas de exergía.

En segundo lugar, la *intensidad exérgica* es una medida que proporciona información de la relación que existe entre la cantidad de exergía producida por cada millón de dólar ganado por la venta de los energéticos (venta interna y externa). Una alta intensidad exérgica del ingreso indica generalmente una baja productividad y una competitividad reducida de la economía de la empresa petrolera. Además, significa que la economía está altamente expuesta a los riesgos derivados de las fluctuaciones de los precios de los energéticos y de las altas cargas de emisiones dañinas al medio ambiente.

En seguida, el *fortalecimiento de la calidad energética* indica la cantidad de inversión (gasto de inversión) derogada a la empresa por concepto de exportación para el mejoramiento de la calidad energética (exergía) de los productos elaborados. Es decir, es una medida de sustentabilidad que predice si se están haciendo las inversiones adecuadas para el mejoramiento en los procesos de producción de la industria petrolera. Un bajo fortalecimiento indica un decremento en la economía (a futuro) de la empresa por la baja competitividad de los productos en el mercado nacional e internacional.

7.1.2 Dimensión ecológica.

La dimensión ecológica establece un papel muy importante para la sustentabilidad de un sector.

Últimamente se han llevado a cabo mecanismos para mejorar los procesos de transformación, los cuales involucran directamente la reducción de emisiones contaminantes al medio ambiente. Por esta razón, la exergía puede ser un indicador esencial para medir el impacto de degradación exérgica que se hace al medio ambiente.

En primer lugar, la *pureza de uso exérgico* indica la relación que existe entre la cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente por cantidad de consumo exérgico. Este indicador tiene singular significado, al poder establecer en un futuro las políticas tendientes a reducir las emisiones de gases efecto invernadero en el sector petrolero, además de cobrar importancia por la participación de México en el Protocolo de Kioto, así como el posible desarrollo de un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para el mismo sector. Un alto índice de pureza indica un bajo impacto de las emisiones hacia el medio ambiente, así como la eficiencia de los combustibles empleados con bajos niveles de emisiones de CO₂.

En segundo lugar, la *intensidad exérgica de CO₂* proporciona información sobre la cantidad de CO₂ por cantidad de exergía producida como producto final. Indica la calidad ambiental de los productos elaborados, es decir, la cantidad de CO₂ emitido al medio ambiente para elaborar un producto con mayor calidad energética. La sustentabilidad depende en mayor medida del uso eficiente de energía y las tecnologías utilizadas en los procesos de transformación energética. Una alta intensidad exérgica de CO₂ indica el uso inadecuado de los recursos exérgicos por medio de la tecnología utilizada.

Por último, la *pérdida de exergía vinculada a productos* corresponde a la participación de las pérdidas irreversibles de exergía y las pérdidas efluentes de exergía producidas durante la transformación de un recurso energético a un producto con mayor calidad energética (exergía). Este indicador permite identificar la oportunidad de optimización de los procesos para reducir las pérdidas totales de exergía.

7.1.3 Dimensión energética.

La dimensión energética tiene que ver con el uso eficiente de la energía y la optimización de los procesos de transformación del sector. Por esta razón, el desempeño de los programas de uso eficiente de energía podrán establecer nuevas políticas para el desarrollo de proyectos de mejoramiento energético, como aquellos relacionados a la Investigación y Desarrollo Tecnológico, los cuales son uno de los pilares del crecimiento económico y mejoramiento ambiental de cualquier país.

En este contexto, el indicador de *consumo exérgico* permite identificar la cantidad de exergía consumida por cada unidad de exergía producida como producto final. También puede distinguirse como el índice exérgico, ya que proporciona información del grado de dependencia exérgica con que se llevan a cabo en los procesos de transformación y con la tecnología actual. Un bajo índice de consumo exérgico se podría traducir como una alta sustentabilidad debido a la baja dependencia de exergía para lograr el efecto deseado de transformación de los recursos exérgicos.

En seguida, el *uso efectivo de calidad energética* es un indicador atribuible al parámetro de efectividad exérgica (ϵ) de un análisis de exergía. Definido ya por Rivero [42], la efectividad es la medida de la capacidad de un sistema para producir el efecto deseado. En otras palabras, es la exergía neta total suministrada al sistema en la cual el sistema aprovecha para realizar su función. Califica que tan bien se está logrando el efecto deseado.

Finalmente, el *mejoramiento germinal* permite identificar la prioridad de un sistema específico dentro un conjunto de sistemas para ser mejorado. De otra manera, una alto índice de sustentabilidad indica el bajo potencial de mejoramiento exérgico (Pot) que podría hacerse al sistema en relación a los otros sistemas que lo conforman. Este indicador es también atribuible al parámetro exérgico que conforma un análisis de exergía.

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los indicadores aquí desarrollados para el sector petrolero mexicano.

7.2 Análisis de Resultados de los Indicadores de Sustentabilidad Exérgica.

Como se mencionó en párrafos arriba, la metodología utilizada para el desarrollo de los indicadores de sustentabilidad exérgica fue referida de los propuestos por OLADE/CEPAL/GTZ. Tres de los nueve indicadores aquí propuestos fueron considerados de OLADE/CEPAL/GTZ, por lo tanto, los seis restantes son una iniciativa propia para calificar el grado de sustentabilidad del sector petrolero mexicano.

Los indicadores fueron propuestos para cada una de las subsidiarias de Pemex, los cuales cada uno de ellos depende directamente de los datos estadísticos que publica en sus memorias de labores y reportes estadísticos anuales. Además, a partir de dichas publicaciones, se hizo el análisis de exergía antes presentado, por lo que los resultados finales podrían contener alguna disparidad con la realidad.

Para demostrar el cálculo de los indicadores y el criterio del nivel de sustentabilidad de cada uno de ellos, en el Apéndice F de esta tesis se presenta la metodología de cálculo de los que a continuación se desarrollaron.

7.2.1 Análisis de autarquía exérgica.

La base de cálculo se tomó a partir de los resultados obtenidos del análisis de exergia de Pemex (Capítulo VI). Se consideró la oferta exérgica de cada una de las subsidiarias como fue la suma de su producción y las importaciones de energéticos. Los resultados de este indicador se presentan en la Tabla 7.1.

Subsidiaria	Influencia de importaciones en la oferta exérgica (%)	Autarquía exérgica	Nivel de sustentabilidad
PEP	1.50	0.9852	Alto
PR	9.33	0.9147	Alto
PGPB	16.47	0.8585	Alto
PPQ	0.23	0.9976	Alto
Total Pemex	12.37	0.8899	Alto

Tabla 7.1 Indicadores de autarquía exérgica.

De los resultados obtenidos de la tabla anterior, se observa que todas las subsidiarias presentan un nivel alto de sustentabilidad, sin embargo esto sería cuestionable al identificar que el sector petrolero mexicano ha aumentado sus importaciones paulatinamente. México es un alto importador de gas natural ya que carece de la capacidad económica para explotar gas en las regiones en donde se han encontrado importantes yacimientos de este hidrocarburo, además de que la ley está carente de facultades políticas para permitir inversión externa en el sector. Sea el caso de la subsidiaria de PGPB, donde su indicador de autarquía exérgica se presenta como el más bajo del sector petrolero.

Otra subsidiaria, con sustentabilidad alta, pero no con buenas perspectivas, es el que corresponde a PR. El indicador muestra un comportamiento sustentable, sin embargo PR ha incrementado la importación de gasolinas de manera discreta, lo que convierte al sector como vulnerable con el desarrollo económico vigente.

7.2.2 Análisis de intensidad exérgica.

De acuerdo a los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 7.2, y de los criterios del nivel sustentabilidad en el Apéndice F, la subsidiaria con mayor

índice de intensidad exérgica es PPQ. Esto se traduce como una empresa con baja productividad y una competitividad escasa de su economía. Si bien es cierto, la industria petroquímica mexicana está en gran decadencia por la falta de competitividad y problemas de carácter financiero. Es una empresa con graves problemas, sobre todo por la carente inyección de inversión para la modernización de sus plantas de proceso.

Subsidiaria	Intensidad exérgica (MWe/Musd)	Normalización (10 Musd)	Nivel de sustentabilidad
PEP	6.8280	0.6828	Medio bajo
PR	3.8388	0.3838	Medio alto
PGPB	3.4551	0.3455	Medio alto
PPQ	7.5136	0.7513	Medio bajo
Total Pemex	3.4533	0.3453	Medio alto

Tabla 7.2 Indicadores de intensidad exérgica.

En segundo lugar se encuentra PEP, el cual presenta un nivel de sustentabilidad medio bajo debido al alto porcentaje de exportaciones de petróleo crudo. Aunque no se considera una sustentabilidad vulnerable, un cambio en la política económica de la empresa sería relevante, ya que el riesgo se situaría por la dependencia de la economía del país por las exportaciones de este energético. Si en vez de exportar una gran cantidad de crudo se pudiera procesar éste en el país, para posteriormente satisfacer la demanda interna de combustibles y petroquímicos (y hasta probablemente exportar éstos con mayor valor agregado), seguramente la economía de la empresa estaría fortalecida y se tendría una competitividad muy alta.

7.2.3 Análisis de fortalecimiento de la calidad energética.

Este indicador mide la vulnerabilidad económica de las empresas del sector respecto al gasto de inversión que se hace a partir de las cantidad exergía exportada que realiza cada una de ellas.

Como se presenta en la Tabla 7.3, en general se presenta un nivel de sustentabilidad bajo. Esto indica que las inversiones que se hacen a cada una de las empresas subsidiarias es muy reducido. Con especial atención se observa que PPQ carece de fortalecimiento de la calidad energética a partir de las inversiones que ha proporcionado el gobierno, por lo que su vulnerabilidad económica se hace latente.

Subsidiaria	Fortalecimiento de la calidad energética (MWe/Musd inv.)	Normalización (100 Musd)	Nivel de sustentabilidad
PEP	14.4430	0.1444	Bajo
PR	13.4744	0.1347	Bajo
PGPB	22.5318	0.2253	Medio bajo
PPQ	4.2979	0.0430	Bajo
Total Pemex	14.4354	0.1443	Bajo

Tabla 7.3 Indicadores de fortalecimiento de la calidad energética.

Su fortaleza consiste en realizar un gasto de inversión adecuado por unidad de exergia exportada y así no provocar un colapso hacia futuro en la competitividad de la empresa.

7.2.4 Análisis de pureza de uso exérgico.

Los resultados de la Tabla 7.4 presentan en promedio un nivel bajo de sustentabilidad para el sector petrolero. Indica que se tiene una alta cantidad de emisiones de CO₂ por cada MWe consumido. Esta situación se puede atribuir a la eficiencia de los combustibles utilizados en los procesos de transformación, es decir, la cantidad de carbón que se genera durante la combustión. En su caso, se debería proponer el uso de combustibles más limpios así como el desarrollo de proyectos de investigación en tecnología limpia para abatir las emisiones de CO₂ durante la combustión.

Subsidiaria	Pureza de uso exérgico (mil ton CO ₂ /MWe)	Normalización	Nivel de sustentabilidad
PEP	1.7711	0.2289	Medio Bajo
PR	1.7910	0.2089	Medio Bajo
PGPB	1.8853	0.1147	Bajo
PPQ	1.6357	0.3643	Medio Bajo
Total Pemex	1.7730	0.2270	Bajo

Tabla 7.4 Indicadores de pureza de uso exérgico.

Por ejemplo, en el caso de PR, presenta el mayor consumo de exergia de las cuatro subsidiarias. Aunque su indicador no es el más bajo, una gran cantidad de emisiones son arrojadas al medio ambiente. La mayor cantidad de emisiones en una refinería se lleva a cabo en las plantas de destilación combinada e

hidrodesulfuradora de gasóleos, los cuales se deben directamente por el consumo de combustibles en dichas plantas. Una alternativa para reducir las emisiones sería la instalación de sistemas energéticos avanzados como es la tecnología de destilación diabática y la tecnología para la combustión de hidrógeno.

7.2.5 Análisis de intensidad exérgica de CO₂.

Aquí, la intensidad exérgica está caracterizada por la cantidad de exergía de CO₂ que se emite al medio ambiente por cada MWe de producto final. Se interpreta como la carga de exergía (en CO₂) hacia los productos. Como se puede apreciar en la Tabla 7.5, la mayor intensidad exérgica de CO₂ corresponde a PPQ al presentar un índice de sustentabilidad muy bajo.

La cantidad de exergía de CO₂ es directamente proporcional a la cantidad (en masa o volumen) de CO₂ emitido al medio ambiente. Aquí, la importancia de determinar este indicador se centra en proponer mejoras para la reducción de la carga de CO₂ acompañada a los productos. Una propuesta sería establecer un impuesto a productos por la cantidad en MWe de CO₂ emitidos, con el fin de reducir la carga de emisión por medio de un gasto de inversión real proporcionado a la investigación e implementación de nuevas tecnologías.

Subsidiaria	Intensidad exérgica de CO ₂ (MWe CO ₂ /MWe prod.)	Normalización	Nivel de sustentabilidad
PEP	0.00044	0.9261	Alto
PR	0.00245	0.5907	Medio
PGPB	0.00162	0.7286	Medio alto
PPQ	0.00525	0.1250	Bajo
Total Pemex	0.00177	0.7041	Medio alto

Tabla 7.5 Indicadores de la intensidad exérgica de CO₂.

Siendo PPQ la subsidiara con menor nivel de sustentabilidad, sería necesaria la implementación de acciones de corto plazo para abatir las emisiones de CO₂. Ciertamente, cuando se quiere dar a un producto la mejor calidad, es necesaria una mayor cantidad de exergía consumida por medio de los combustibles, lo que provoca directamente una mayor emisión de CO₂. Sin embargo, los problemas de operación y la falta de inversión a PPQ ha provocado que sea cada día menos sustentable.

7.2.6 Análisis de pérdida exérgica vinculada a productos.

Para el cálculo de este indicador, las pérdidas de exergía totales son consideradas aquí. Indican el porcentaje de las pérdidas de emisiones y pérdidas irreversibles de exergía que son generadas por cada MWe de producto final. A diferencia del indicador anterior, aquí las pérdidas de emisiones son todas aquellas generadas por derrames, fugas, emisiones de gases, desfuegos y quemas de cada una de las subsidiarias. La Tabla 7.6 presenta los resultados de este indicador.

La calificación del indicador normalizado permite identificar el grado de sustentabilidad, por lo que nuevamente PPQ tiene la menor calificación de sustentabilidad. Este resultado indica que la oportunidad de implementar acciones de mejoramiento en la empresa deben ser inmediatas. La contribución de PPQ en la degradación del medio ambiente es alta, y esto debe considerarse como prioritario en el sector.

Subsidiaria	Pérdida exérgica vinculada a productos	Normalización	Nivel de sustentabilidad
PEP	0.1565	0.4948	Medio
PR	0.0740	0.7791	Medio alto
PGPB	0.0575	0.8362	Alto
PPQ	0.2824	0.0607	Bajo
Total Pemex	0.2113	0.3057	Medio bajo

Tabla 7.6 Indicadores de pérdida exérgica vincula a productos.

En general, ninguna de las subsidiarias de Pemex presenta un nivel de sustentabilidad alto, por lo que las medidas de mejoramiento ambiental actual deberían ser re-evaluadas y considerar el método de análisis de exergía para lograr establecer políticas ambientales adecuadas para reducir el impacto ambiental.

7.2.7 Análisis de consumo exérgico.

Comúnmente se considera como el consumo energético, sin embargo, aquí se modifica su concepto por el uso y/o consumo exérgico. Dicho consumo exérgico está íntimamente vinculado con el consumo de los energéticos que son utilizados en los procesos de transformación para producir productos con mayor valor agregado. También se conoce como el índice energético.

El indicador permite identificar la eficiencia en el uso de los combustibles, principalmente. Los resultados de dicho indicador aparecen reportados en la Tabla 7.7.

Subsidiaria	Consumo exérgico	Normalización	Nivel de sustentabilidad
PEP	0.0175	0.9417	Alto
PR	0.0958	0.6807	Medio alto
PGPB	0.0603	0.7989	Medio alto
PPQ	0.2242	0.2527	Medio bajo
Total Pemex	0.0699	0.7669	Medio alto

Tabla 7.7 Indicadores de consumo exérgico.

Como se observa en la Tabla arriba, un alto valor de consumo exérgico se traduce como un sistema con poco nivel de sustentabilidad, por lo tanto el indicador normalizado establece que entre más cercano a 1, éste será más sustentable. En este contexto, nuevamente no es así para PPQ. Siendo realistas, la eficiencia de producción de PPQ no es sustentable. La subsidiaria presenta un alto consumo de exergía debido a la falta de inversión para la modernización de sus plantas. La situación de la petroquímica de Pemex no es alentadora, pues debido al rezago de inversión, se han cerrado varias plantas de proceso. Es así como este indicador demuestra la vulnerabilidad de los complejos petroquímicos de Pemex ante los cambios y modernizaciones de otras compañías del ramo, lo que ha provocado que sus empresas no sean competitivas.

7.2.8 Análisis de uso efectivo de calidad energética.

Este indicador es directo al parámetro de efectividad exérgica desarrollado por Rivero [42]. Aquí se da otro nombre sólo por conceptos de sustentabilidad, por lo que no se pretende discernir del concepto desarrollado por Rivero.

Como se mencionó anteriormente, la efectividad mide la capacidad del sistema para lograr el efecto deseado. Por lo tanto, y en consideración a los resultados de la Tabla 7.8, el sector petrolero mexicano presenta un nivel bajo de sustentabilidad en este rubro. Es decir, cada una de las subsidiarias no tiene la capacidad de lograr el efecto que desea. Desde el punto de vista operativo, los procesos son poco efectivos para llevar a cabo la transformación de sus productos.

Subsidiaria	Uso efectivo de calidad energética	Nivel de sustentabilidad
PEP	0.0820	Bajo
PR	0.1602	Bajo
PGPB	0.0499	Bajo
PPQ	0.2658	Medio bajo
Total Pemex	0.0854	Bajo

Tabla 7.8 Indicadores de uso efectivo de calidad energética.

Un índice de sustentabilidad alto representa la mayor cantidad de exergía aprovechada del sistema a partir de la exergía que fue suministrada. De esta manera, entre mayor sea la calidad de aprovechamiento, mayor será su sustentabilidad.

7.2.9 Análisis de mejoramiento germinal.

El indicador de mejoramiento germinal es una ponderación del potencial de mejoramiento (Pot) que presenta cada una de las subsidiarias. El Pot fue desarrollado por Rivero [42] e identifica la cantidad en unidades exérgicas que puede ser mejorado el sistema con fines de optimización. La palabra germinal se le da para referirse a conceptos de sustentabilidad.¹

Como se aprecia en la Tabla 7.9, la subsidiaria que presenta el mayor índice de mejoramiento germinal es PEP. Por el contrario, se distingue que el indicador normalizado lo presenta como el menor. Esto se traduce como sigue: entre más cercano a 1 sea el indicador normalizado, éste podría considerarse más sustentable por efectos de mejoramiento.

Subsidiaria	Mejoramiento germinal	Normalización
PEP	0.8038	0.1962
PR	0.0936	0.9064
PGPB	0.0468	0.9532
PPQ	0.0559	0.9441
Total Pemex	---	---

Tabla 7.9 Indicadores de mejoramiento germinal.

¹ Germinal del latín “*germen = semilla*” y el subfijo “*al*” (que pertenece a la estación de la primavera). En francés, es el nombre del séptimo mes del calendario republicano francés, el primero de la estación primaveral.

Por ejemplo, en el caso de PEP, se encontró que esta subsidiaria tiene un indicador normalizado muy bajo, y esto se debe a la gran cantidad de crudo que exporta.² Desde el punto de vista exérgico, su potencial está enfocado a tratar de procesar la mayor cantidad de crudo exportado en el propio país, lo que obligaría a la empresa en proyectar sus gastos de inversión para la instalación de nuevas plantas de proceso y así darle un mayor valor agregado al crudo mexicano (los productos de él). Esto podría traducirse como un problema de operación de la empresa, ya que carece de infraestructura para el procesamiento en bruto de todo el crudo que extrae. En suma, no se aprovecha la exergía del crudo para elaborar productos con mayor valor exérgico.

7.3 Resultados Gráficos de los Indicadores de Sustentabilidad Exérgica.

En los siguientes párrafos se presentan los diagramas de patrón de sustentabilidad de cada una de las subsidiarias de Pemex. Estos diagramas permiten visualizar el grado de sustentabilidad de cada una de ellas, por lo que resultaría sencillo entender cada uno de los indicadores y el estado que guardan en las subsidiarias. La escala que presenta cada uno de los diagramas es de 0 a 1, el cual representa el grado de sustentabilidad; entre más cercano a 1, el sistema será más sustentable para algunos indicadores. Asimismo, permite hacer una comparación entre las subsidiarias por medio de su valor promedio, y así determinar cuál de ellas es más sustentable por cada uno de los indicadores desarrollados.

7.3.1 Patrones de sustentabilidad exérgica de PEP, PR, PGPB y PPQ.

Un patrón se considera como la unidad que se toma como referencia para medir o valorar un sistema. Aquí, la referencia es que entre mayor sea el área en cada uno de los gráficos de patrones de sustentabilidad, mayor será su nivel de sustentabilidad. Para tal hecho, cada una de las gráficas de patrón presenta el Índice General de Sustentabilidad Exérgica (IGSEx),³ el cual permite establecer la comparación entre cada una de ellas.

A continuación se presentan de manera consecutiva las gráficas de patrones de sustentabilidad exérgica de cada una de las subsidiarias de Pemex.

² El crudo exportado aquí se consideró como una pérdida efluente de exergía, por tal motivo el potencial de mejoramiento resulta como el más elevado en comparación con las otras subsidiarias de Pemex.

³ El IGSEx se obtiene a partir del valor promedio de los ISEx de cada subsidiaria.

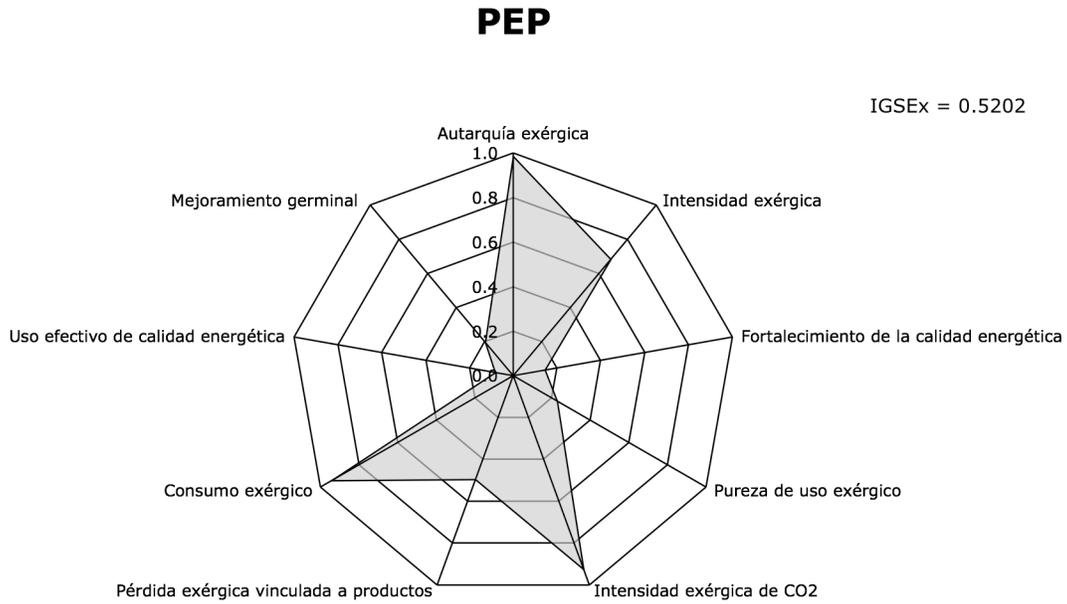


Figura 7.1 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PEP.

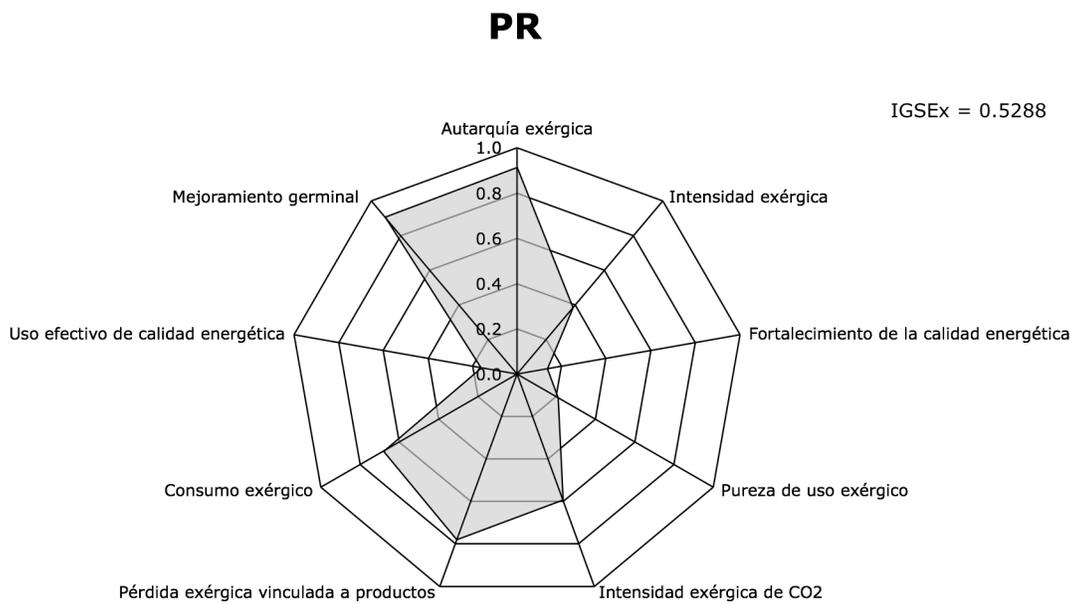


Figura 7.2 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PR.

PGPB

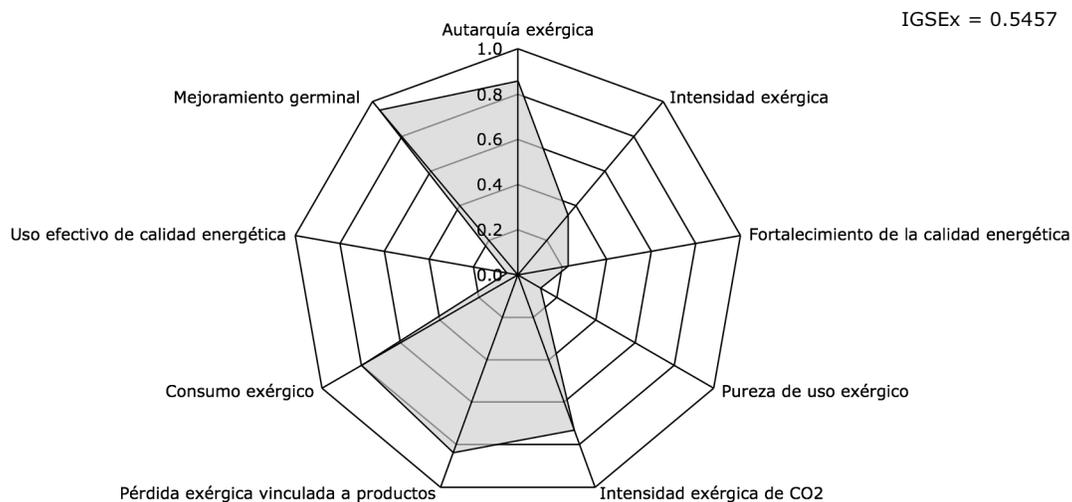


Figura 7.3 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PGPB.

PPQ

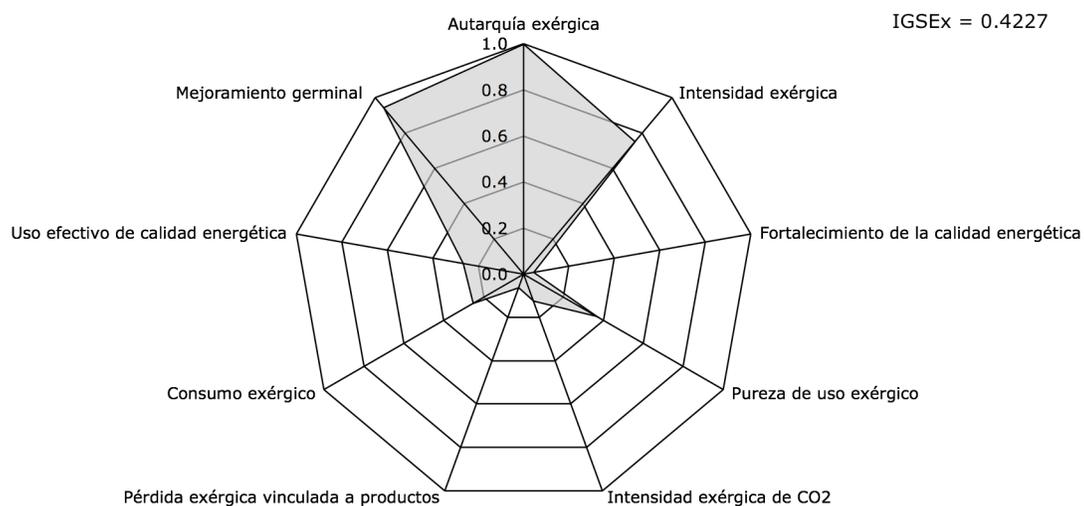


Figura 7.4 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para PPQ.

Como se puede observar en las gráficas arriba presentadas, la subsidiaria con el menor patrón de sustentabilidad es PPQ. Este resultado se obtiene a partir del IGSEx calculado para cada una de las subsidiarias. Además, se puede observar que PPQ es la que presenta la menor área en la gráfica de patrón de las cuatro subsidiarias, lo cual es sustentado por su IGSEx.

7.3.2 Análisis general de los patrones de sustentabilidad exérgica.

Las figuras arriba presentadas permiten identificar el estado que guardan cada una de las subsidiarias en relación a los indicadores aquí desarrollados.

En referencia, se puede observar que la subsidiaria con menor nivel de sustentabilidad es PPQ (Figura 7.4) debido a su IGSEx. No es casualidad que esta subsidiaria desempeñara un bajo nivel de sustentabilidad, ya que en la última década ha presentado muchos problemas de competitividad, operación, financiamiento y seguridad. Siete de los nueve indicadores califican a PPQ como insustentable o con niveles bajos de sustentabilidad. En contraste, PPQ muestra un indicador de autarquía exérgica con un nivel alto de sustentabilidad, sin embargo esto podría discernir con la realidad; las importaciones de petroquímicos han aumentado y algunas plantas de proceso se han cerrado por la falta de inversión y problemas de operación.

Por otro lado, las figuras con un patrón de sustentabilidad parecido son los correspondientes a PR y PGPB (Figuras 7.2 y 7.3). Los indicadores de intensidad exérgica de CO₂, pérdida exérgica vinculada a productos y consumo exérgico son relativamente superiores para PGPB en comparación con PR. En contraste, los indicadores de intensidad exérgica, fortalecimiento de la calidad energética, pureza de uso exérgico y uso efectivo de calidad energética, PR reporta niveles de sustentabilidad superiores a PGPB.

Por su parte, el indicador de autarquía exérgica para PR y PGPB presentan un nivel de sustentabilidad por debajo de PEP (Figura 7.1) y PPQ. Esto se diferencia debido a que PR y PGPB son dependientes de las importaciones de petrolíferos y gas natural. En el caso de PR, la importación de gasolinas demuestra que la industria de refinación es vulnerable económicamente por la variación de precios de los productos refinados, y en mayor importancia, al precio internacional del petróleo crudo. Para el caso de PGPB, la importación de gas natural se ha incrementado paulatinamente debido a la demanda interna por medio de la instalación de plantas de generación de energía eléctrica. Aquí, correspondería a PGPB desarrollar mecanismos que permitan una mayor participación de inversión para la producción de gas natural.

Para el indicador de uso efectivo de calidad energética, PGPB presenta el nivel más bajo de sustentabilidad. Esto demuestra que PGPB muestra una baja

capacidad de lograr el efecto deseado. La exergía neta total producida ($E_{x_{ntp}}$) de PGPB es limitada debido a que no produce hidrocarburos con mayor calidad energética. Desde el punto de vista exérgico, PGPB procesa gas para producir gas y petroquímicos básicos, y no le da un mayor valor agregado (exergoeconómico) a los productos. Una idea futurista, sería que PGPB procesara gas y produjera hidrocarburos con mayor exergía; es el caso de la producción de hidrógeno.⁴ El gas puede ser catalizado y transformado en hidrógeno, el cual tiene una alta cantidad de exergía.

Para el caso de PEP, esta subsidiaria presenta una alta sustentabilidad en autarquía exérgica, ya que no depende de importaciones de hidrocarburos, sin embargo, si se sigue con las políticas energéticas que se ejecutan hoy en día en el sector, seguramente el indicador será modificado a la baja.⁵

En lo referente al indicador de intensidad exérgica, PPQ es la que presenta un menor índice de sustentabilidad. Esto se traduce como una empresa con baja productividad y una competitividad escasa de su economía. Si bien es cierto, la industria petroquímica mexicana está en gran decadencia por la falta de competitividad y problemas de carácter financiero. Es una empresa con graves problemas, sobre todo por la carente inyección de inversión para la modernización de sus plantas de proceso. Por su parte, PEP muestra un nivel medio de sustentabilidad para este indicador, por lo tanto se traduce como inestabilidad económica de la empresa por su vulnerabilidad en la exportación de crudo y los precios en el mercado internacional.

En general, es así como puede realizarse una comparación de los niveles de sustentabilidad para cada una de las subsidiarias. Las graficas de patrones de sustentabilidad son útiles para identificar el estado que guardan las subsidiarias.

7.4 Indicadores Generales del Sector Petrolero Mexicano: Pemex.

Desde un contexto general, aquí se presentan los indicadores de sustentabilidad exérgica de Pemex. La evaluación se desarrolló considerando la suma total de las variables de sustentabilidad de cada indicador. Por ejemplo,

⁴ Partiendo de la base química del gas natural, considerado aquí como CH_4 , en el proceso de reformación se obtendrían cuatro moléculas de hidrógeno por cada molécula de carbono. Si se tratará de transformar a la industria del gas en una industria de hidrógeno, entonces podrían obtenerse beneficios energéticos, económicos y ecológicos muy importantes por la venta de energía de alta calidad (exergía). En consecuencia, se pudiera entonces nombrar a PGPB en un futuro como Pemex Hidrógeno (PH).

⁵ Una política de exportación de crudo implica la depreciación de los yacimientos, lo que provoca una declinación de los mismos y podrían redundar en que los niveles de producción y exportación no fuesen sustentables en el largo plazo. Si no se hace un cambio en la política energética referente a la exportación de crudo y reposición de reservas, México podría ser un importador de crudo en el mediano plazo.

para el caso de autarquía exérgica, se consideró la producción de exergía total y la suma de las importaciones de exergía de cada una de las subsidiarias. Dicha evaluación para cada indicador, aparece reportado en el Apéndice F de esta tesis.

De los resultados obtenidos, y presentados en la Tabla 7.10, se observa que los niveles de sustentabilidad para Pemex son de carácter medio. El indicador con el menor nivel de sustentabilidad es el que corresponde al fortalecimiento de la calidad energética.

	Indicador	Normalización	Nivel de sustentabilidad
	Autarquía exérgica	12.37	Alto
	Intensidad exérgica	3.4533	Medio alto
	Fortalecimiento de la calidad energética	14.4354	Bajo
	Pureza de uso exérgico	1.7730	Bajo
	Intensidad exérgica de CO ₂	0.00177	Medio alto
	Pérdida exérgica vinculada a productos	0.2113	Medio bajo
	Consumo exérgico	0.0699	Medio alto
	Uso efectivo de la calidad energética	0.0854	Bajo

Tabla 7.10 Indicadores de Sustentabilidad Exérgica de Pemex.

De acuerdo con la definición del indicador de fortalecimiento de la calidad energética en la sección 7.2.3, se entiende que el gasto de inversión que realiza Pemex a sus subsidiarias es mínimo en relación a la cantidad de exergía exportada. Pemex requiere de mayor gasto de inversión para fortalecer su industria petrolera. La alta dependencia de los ingresos federales respecto a los ingresos petroleros de Pemex, no permite a ésta una autonomía financiera para incrementar los gastos de inversión. Desde el punto de vista exérgico, un análisis exergoeconómico para Pemex podría establecer políticas económico-financieras para contrarrestar la vulnerabilidad económica de la industria, ya que se identificarían los costos de producción por su calidad energética.

Otro indicador con bajo nivel de sustentabilidad es la pureza de uso exérgico. Pemex debería implementar nuevos mecanismos para reducir las emisiones de CO₂, y uno de ellos sería la ejecución de evaluaciones exérgico-ambientales (o exergoecológicas) para determinar las áreas de oportunidad de mejoramiento ecológico. También podrían establecerse proyectos MDL para Pemex basados sobre los principios del concepto de exergía.⁶

⁶ Una idea propuesta podría ser la ejecución de proyectos MDL apoyados esencialmente por el concepto de exergía, ya que su metodología permite identificar las áreas de oportunidad de mejoramiento energético-económico-ecológico de

Similarmente al indicador antes analizado, el indicador de pérdida exérgica vinculada a productos presenta un nivel de sustentabilidad bajo. Una propuesta para abatir las pérdidas de exergía es el desarrollo de proyectos MDL, los cuales podrían distinguirse por la puesta en marcha de análisis de exergía en el sector petrolero para identificar las áreas de oportunidad para el mejoramiento de los procesos.

Por otro lado, se presenta la gráfica de patrón de sustentabilidad para Pemex, la cual se muestra en la Figura 7.5. Como resultado, cuatro de los ocho indicadores presentados son de nivel bajo, es decir, Pemex es a grosso modo 50% no sustentable en algunas partes de sus dimensiones.

En la dimensión económica, Pemex carece de fortalecimiento de calidad energética, por lo que el incremento de las inversiones deberían realizarse.

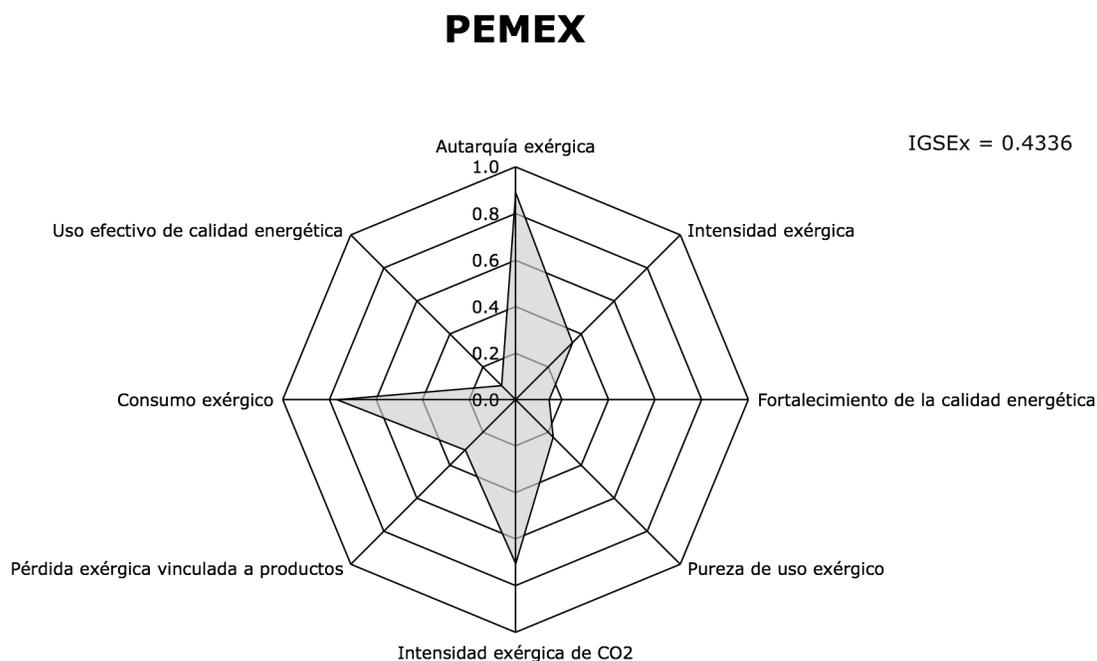


Figura 7.5 Diagrama de patrón de sustentabilidad exérgica para Pemex.

los procesos de transformación. Asimismo, se obtendrían beneficios importantes por la transferencia de tecnología (propia) limpia para la reducción de emisiones. A partir del análisis de exergía, se podrían desarrollar proyectos de investigación y desarrollo tecnológico (I&DT) y de optimización de tecnologías existentes para la generación de reducciones certificadas de emisiones (RCE) que sean reales, mesurables y de largo plazo.

Por su parte, en la dimensión energética, el indicador de uso efectivo de calidad energética califica a Pemex con un bajo nivel de sustentabilidad, ya que la empresa no cumple con la función de lograr el efecto deseado.

En lo que corresponde a la dimensión ecológica, los problemas de pureza debido a emisiones de gases efecto invernadero deberían atenderse como prioritarios, ya que representan un mayor impacto en el nivel de sustentabilidad del sector. De igual magnitud, las pérdidas totales de exergía podrían reducirse al implementarse proyectos de optimización energético-ambiental.

Finalmente, se puede observar que Pemex presenta un nivel de sustentabilidad medio. Este resultado se determina al considerar los criterios de niveles de sustentabilidad presentados en el Apéndice F y el valor del IGSEx para Pemex. De acuerdo a dichos criterios, y observando que el IGSEx de Pemex se encuentra en el rango de 0.41 - 0.60, entonces se determina que Pemex guarda un nivel medio de sustentabilidad exérgica.

Capítulo VIII

Conclusiones generales.

8.1 Conclusiones generales.

El análisis de exergía es una herramienta muy útil para identificar el uso eficiente de la energía en los procesos industriales. Su método de análisis permite establecer parámetros para cuantificar la calidad de la energía en cada bloque de un sistema, sea este de aspecto energético, económico, ecológicos y social. Su aplicación es de gran ayuda para establecer criterios de optimización así como en la dirección de proyectos de investigación y desarrollo que involucre el uso de la energía.

Por su parte, el concepto de sustentabilidad proporciona las bases para establecer las vías adecuadas para el cuidado del entorno global. Aunque a menudo se entienda que la sustentabilidad tiene que ver con el medio ambiente, éste va más allá de aquella dimensión. La sustentabilidad involucra las relaciones complejas entre las dimensiones energéticas, económicas, medio ambientales y sociales, por lo que su estudio es extenso y con grandes desafíos. Una definición que busca la interacción objetiva de estas dimensiones es aquella que se hizo en la publicación del Reporte Brundtland, el cual es conocido como “Desarrollo Sustentable”, asentándose como *el desarrollo que conoce las necesidades del presente sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades.*

Ahora bien, aun cuando el concepto de desarrollo sustentable sea cada vez más conocido, pasando a ser casi obligatorio referirse a él en las propuestas de cambio y desarrollo de todo y cualquier sistema, en verdad pareciera que resulta difícil en saber cuánto un determinado proceso o un sistema es, en términos absolutos o relativos, sostenible. Para ello, la cuantificación de la sustentabilidad se ha presentado ya por el desarrollo de diversos indicadores, los cuales han presentado razonable difusión, como pueden ser aquellos relacionados con los niveles de emisiones contaminantes o la productividad energética en referencia al Producto Interno Bruto. Sin embargo, la sustentabilidad sigue siendo más un adjetivo que un sustantivo. Es importante la cuantificación de la sustentabilidad, y las complejas relaciones que existen entre los sistemas imponen que se utilice no solamente uno sino diversos indicadores y parámetros, simultáneamente, para expresar la estabilidad y las posibilidades de continuidad temporal de un padrón de relaciones entre el hombre y su medio.

En consecuencia, el interés que se presentó aquí para cuantificar el nivel de sustentabilidad se dio por el vínculo que existe entre el concepto de exergía y el desarrollo sustentable. Una manera de cuantificar la sustentabilidad de un sistema es por medio del cálculo de los parámetros del método de análisis de exergía, pues es una indicación técnicamente precisa del grado de reversibilidad o del efectivo impacto sobre el medio consecuente de la implantación y

operación de dicho sistema. Además, los criterios para establecer si un determinado sistema es sustentable o no está fundamentado ya no por criterios relativos, sino fortalecido por un concepto termodinámico.

Siendo la energía un elemento esencial para la calidad de vida del ser humano, y en específico la que se desprende del uso del petróleo, la hace de manifiesto para su adecuada cuantificación de la sustentabilidad. En contexto, la investigación aquí desarrollada se distinguió esencialmente al desarrollo de indicadores en el sector petrolero mexicano involucrando el concepto de exergía en su conjunto.

El sector petrolero en México es una parte de la columna vertebral económica del país, por lo que la cuantificación de su nivel de sustentabilidad es de suma importancia para identificar la vulnerabilidad de dicho sector en sus distintas dimensiones. Por esta razón, aquí se determinaron los *indicadores de sustentabilidad exérgica* (ISEx) del sector petrolero mexicano.

Para lograrlo, se realizó el análisis de exergía del sector petrolero mexicano, el cual está representado por Petróleos Mexicanos (Pemex). Se calcularon los parámetros exérgicos de cada una de las subsidiarias de Pemex: Pemex Exploración Producción (PEP), Pemex Refinación (PR), Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB) y Pemex Petroquímica (PPQ). Es importante señalar, que el cálculo de exergía correspondió a la exergía química estándar de cada una de las corrientes involucradas de las subsidiarias, por lo que los resultados pudieran presentar ciertas limitaciones en su significado en relación al análisis de exergía total (exergía física más exergía química) del sector. Aún así, los resultados expuestos en la investigación pudieron dar un panorama de cómo se comporta exérgicamente cada una de las subsidiarias.

Del análisis de exergía de Pemex, se puede observar que existe una considerable pérdida de exergía en el sector, el cual corresponde aproximadamente por arriba del 18% de la exergía total a la entrada. Las pérdidas se deben principalmente al alto volumen de exportación de crudo. En este contexto, la calidad de la energía que aporta el crudo de exportación es muy valiosa por lo que su aprovechamiento en el propio país resultaría con mayores beneficios exergoeconómicos. Por otro lado, Pemex presenta una baja efectividad exérgica, es decir, no cumple adecuadamente su función para efectuar los objetivos destinados de la empresa; en particular los de PGPB. Esta situación puede ser explicada por los diversos problemas que ha presentado Pemex, destacando los problemas de inversión para la modernización de sus plantas. Cuanto más sea el deterioro y envejecimiento de las instalaciones, la efectividad exérgica será disminuida proporcionalmente. En adición, las políticas energéticas mal dirigidas impactan directamente a la eficiencia exérgica del sector, por lo que al realizar un análisis de exergía podrían cambiar las direcciones de política y así tomar decisiones adecuadas y sostenibles.

En relación a los resultados correspondientes a los indicadores de sustentabilidad exérgica, se determinaron indicadores de dimensiones económicas, ecológicas y energéticas. Para la dimensión económica corresponde la autarquía exérgica, la intensidad exérgica y el fortalecimiento de la calidad energética. Por su parte, en dimensión ecológica le corresponde la pureza de uso exérgico, la intensidad exérgica de CO₂ y la pérdida de exergía vinculada a productos. Por último, la dimensión energética se estableció con el consumo exérgico, el uso efectivo de la calidad de la energía y el mejoramiento germinal. Los primeros tres indicadores parten de la fuente del estudio de OLADE/CEPAL/GTZ, y aquí son reestructurados para diferenciar el aspecto energético por el aspecto exérgico.

Para el caso del sector petrolero, los indicadores abarcan el análisis de los datos presentados por Pemex en el año 2004, ya que es la información que se pudo triangular con mayor facilidad a la que publica la Secretaría de Energía.

En correspondencia con los resultados de los indicadores de dimensión económica, se puede observar que el sector muestra un nivel de sustentabilidad medio alto, a excepción del fortalecimiento de la calidad energética, el cual mostró un nivel bajo. Para éste último, se califica que Pemex no cuenta con una industria fortalecida para atender la competencia de la misma, ya que los gastos de inversión son limitados y provocará un continuo descenso de competitividad.

Por su parte, la dimensión ecológica presentó un nivel de sustentabilidad entre bajo y medio. El indicador con nivel bajo correspondió al de pureza de uso exérgico, por lo que esta situación puede ser explicada por la alta cantidad de emisiones de gases efecto invernadero; Pemex debería implementar nuevos mecanismos para reducir las emisiones de CO₂ principalmente, y uno de ellos podría ser la ejecución de evaluaciones exérgico-ambientales (o exergoecológicas) para determinar las áreas de oportunidad de mejoramiento ecológico. Otro indicador con nivel bajo lo representó la pérdida exérgica vinculada a productos, y se debe principalmente por la falta de proyectos de optimización en los procesos de transformación de algunas de las subsidiarias; sobretodo para PPQ, la cual presenta el nivel más bajo de sustentabilidad para este indicador. Un caso contrario sucede con el indicador de intensidad exérgica de CO₂, donde se presenta un nivel de sustentabilidad medio; aquí la cantidad de exergía emitida al medio ambiente es representativa nuevamente por PPQ, y esto se podría entender por los problemas de operación y modernización de esta industria.

Los indicadores de dimensión energética son una derivación de los parámetros exérgicos que se obtienen del análisis de exergía realizado a Pemex. Aquí, mientras se presenta un nivel medio alto de sustentabilidad para el indicador de consumo exérgico, el indicador de uso efectivo de la calidad energética es bajo. Por su parte, el indicador de consumo exérgico califica un uso eficiente de los

combustibles, esto quiere decir, que Pemex no presenta un excesivo consumo de combustibles por cada MWe producido de producto final. Por otro lado, el indicador de uso efectivo de calidad energética es bajo por la falta de efectividad de Pemex al no cumplir adecuadamente su función para efectuar los objetivos destinados de la empresa; principalmente por los procesos de transformación energética.

En referencia a la evaluación del nivel de sustentabilidad de las subsidiarias de Pemex por medio de las gráficas de patrones de sustentabilidad exérgica, se determinó que PPQ es la subsidiaria con el menor nivel de sustentabilidad. Este resultado está fundamentado por el cálculo del índice general de sustentabilidad exérgica (IGSEx). En este contexto, PPQ ha sido la subsidiaria que ha cargado con el mayor peso de los problemas de operación, financiamiento y competitividad de la empresa. Es entonces que a partir de una base termodinámica se pueden dar soluciones para combatir el mal funcionamiento de la empresa y dirigidos hacia los aspectos energéticos, económicos y ecológicos. Es decir, Pemex debería cambiar su política de ser un exportador de crudo, sino ser una empresa que explote y produzca sus recursos energéticos para generar productos con mayor valor agregado y calidad energética dentro de sus subsidiarias para permitirles ser más competitivas y estar a la vanguardia con la premisa de tener niveles de sustentabilidad aceptables.

Los resultados presentados en esta tesis, aun cuando puedan contener limitaciones en su metodología de cálculo y significado, pueden ser una herramienta útil para promover estudios más específicos en el desarrollo de indicadores de sustentabilidad para Pemex. Es necesario recordar que se debe partir de la base del concepto de exergía para su formulación, por lo que obligaría a hacer un balance riguroso de materia y energía del sector, ya que si se encuentran irregularidades en los balances de materia y energía, el balance de exergía será limitado. Adicionalmente, se considera que este estudio pueda incidir en la toma de decisiones en la política energética de Pemex para dirigir sus esfuerzos en trabajar hacia un desarrollo verdaderamente sustentable.

Referencias bibliográficas

- [1] World Energy Council, Living in one World: sustainability from energy perspective, Publisher by World Energy Council, London, United Kingdom, 2001, 196 pp.
- [2] World Energy Council, Energy for tomorrow's World: acting now, London, United Kingdom, 2000, 175 pp.
- [3] Declaración de Estocolmo sobre el Medio Humano, disponible en Internet: www.miliarium.com/Proyectos/Agenda21/memoria/Estocolmo.pdf
- [4] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), disponible en Internet: www.iucn.org/themes/sustainableuse/
- [5] World Commission on Environment and Development, Our common future, New York: Oxford University Press, 1987.
- [6] Comisión sobre Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas (UNCSD), disponible en Internet: www.un.org/esa/sustdev/csd.htm
- [7] Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations, General Assembly, A/42/427, 4 August 1987.
- [8] Enkerlin, E., Cano, G., Garza, R., Vogel, E., Ciencia ambiental y desarrollo sustentable, International Thomson Editores, ISBN: 968-7529-02-4, México, 1997, 690 pp.
- [9] Convención de Basilea, 1989, Sobre el control del movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y su eliminación, UNEP, Primera versión, Serie de la Convención de Basilea/SBC N° 99/009 (S), Ginebra, Suiza, mayo de 2000, 66 pp.
- [10] The United Nation Conference on Environment and Development, disponible en Internet: www.un.org/geninfo/bp/enviro.html
- [11] Instituto Nacional de Ecología (INE), Convención marco sobre cambio climático, México, disponible en Internet: www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/conv/index.html
- [12] United Nations, Implementing Agenda 21, Report of the Secretary General, Economic and Social Council, E/CN.17/2002/PC2/7, December 2001, 62 pp.
- [13] Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, United Nations, FCCC/INFORMAL/83, GE.05-61702 (S), 130605, 1998, disponible en Internet : http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php

- [14] Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable, Grupo add-hoc de la sociedad civil y autoridades ambientales regionales de Colombia, Bogotá, Colombia, abril 12 de 2002, disponible en Internet: www.rsd.org.co/rio10/ad-hoc
- [15] Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable, Johannesburgo, Sudáfrica, disponible en Internet: www.johannesburgsummit.org/index.html
- [16] Feature Store, The Johannesburg Summit Test: what will chance?, disponible en Internet: www.johannesburgsummit.org/html/whats_new/newsarchives.html
- [17] Report of the works summit on sustainable development, Johannesburg, South Africa, August 26 - September 4, 2002, United Nations Publications, ISBN: 92-1-104521-5, New York, USA, 2002.
- [18] Naciones Unidas, ¿Qué cambiaría con la cumbre de Johannesburgo?, publicado por la Información Pública de las Naciones Unidas, enero de 2002, disponible en Internet: www.un.org
- [19] Naciones Unidas, Cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible, Tema 8 del programa provisional: agua, energía, salud, agricultura y biodiversidad, A/CONF.199/L.4, agosto de 2002, 15 pp.
- [20] OECD/IEA, Energy technology and climate change: A call to action, 2000, Paris, France.
- [21] OECD/IEA, Towards solutions - Sustainable development in the energy sector, Paris, France, 2002, 20 pp.
- [22] International Atomic Energy Agency, Indicators of Sustainable Energy Development, Division of Public Information, 02-01570/FS Series 2/02/E, disponible en Internet: www.iaea.org
- [23] Programa Synergy 2002, Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto - Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica, Guía Latinoamericana del MDL, Abril 2005, disponible en Internet: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/secprivcc/mdl.html
- [24] United Nations Framework Convention on Climate Change, Clean Development Mechanism (CDM), disponible en Internet: <http://cdm.unfccc.int/methodologies>
- [25] Sadi Carnot, Reflections on the motive power of fire, Peter Smith Publisher; ISBN: 0844618098, 1992, translation from first edition in French.
- [26] DeBaufre, W. L., Analysis of power-plant performance based on the second law thermodynamics, Mechanical Engineering, Vol. 47, N° 5, May 1925, pp. 426 - 428.
- [27] Fratzscher, W., Fran Bosnjakovic and the School of Engineering Thermodynamics in Dresden, Proceedings of the International Conference ECOS'2002, berlin, Germany, 2002, pp 1 - 6.
- [28] Rivero, R., Montero, G., Pulido, R., Terminología para la aplicación del método de exergia, Revista del IMIQ, Año XXXI, Vol. 17, Septiembre - Octubre 1990, pp. 7 - 11.
- [29] Szargut, J., Morris, D., Steward, F., Exergy analysis of thermal and metallurgical processes, Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 1998, 332 pp.
- [30] Szargut, J., Exergy Method: Tchemical and Ecological Applications, WIT Press, United Kingdom, ISBN: 1853127531, May 30, 2005, 164 pages.
- [31] Szargut, J., Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes, Energy, Vol. 27, N° 4, 2002, pp. 379 - 389.
- [32] Kotas, T. J., The exergy method of thermal plant analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995, 328 pp.

- [33] Tribus, M., Evans, R., The thermoeconomics of sea water conversion, UCLA Report N° 62 - 63, August, United States.
- [34] LeGoff, P., Matsuda, H., Rivero, R., Advanced in chemical heat pumps and heat transformers, En: Solving energy and environmental challenges, ISBN: 0-08-040193-7, T. Saito & Y. Igarashi, Editors, Pergamon Press, Tokio, Japan, 1990, pp. 117 - 126.
- [35] LeGoff, P., Rivero, R., A thermal inventory of sorption heat pumps based on the exergy-multipole concept, Proceedings of the Internacional Conference ECOS'95, Vol. 1, Y. A. Göğüs, A. Oztürk & G. Tsatsaronis, Editors, Istambul, Turkey, 1995, pp. 190 - 194.
- [36] Wall, G., Exergy conversión in the Swedish society, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology and University of Goteborg, disponible en Internet: www.exergy.se
- [37] Wall, G., Exergy conversión in the Japanese society, Energy, Vol. 15, N° 5, 1990, pp. 435 - 444.
- [38] Wall, G., Sciubba, E., Naso, V., Exergy use in the Italian society, Energy, Volume 19, N° 12, 1994, pp. 1267 - 1274.
- [39] Wall, G., Exergy conversión in the Society of Ghana, Presented at The 1st International Conference on Energy and Community Development, Athens, Greece, 10 - 15 July, 1978, 8 pp.
- [40] Moran, M., Availavility analysis: a guide to efficient energy use, ASME Press, New York, 1989, 260 pp.
- [41] Moran, M., Shapiro, H., Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Wiley, ISBN: 0471274712, June 11, 2003, 5th Edition, 896 pages.
- [42] Rivero, R., Ph. D. Thèse (1993), L'analyse d'exergie: application à la distillation diabatique et aux pompes à chaleur à absorption, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 680 pp.
- [43] Rivero, R., El análisis de exergia, Revista del IMIQ, Año XXXV, Vol. 11, Noviembre 1994, pp. 14 - 27.
- [44] Rivero, R., Application of the exergy concept in the petroleum refining and petrochemical industry, Energy Conversion & Management, Vol. 43, 2002, pp. 1199 - 1220.
- [45] Rivero, R., Análisis exergoeconómico de procesos, Revista del IMIQ, Año XXXVI, Vol. 7 - 8, Julio - Agosto 1995, ISBN: 0188-7319, pp. 19 - 24.
- [46] De Oliveira Jr., S., Van Hombeeck, M., Exergy analysis of petroleum separation processes in offshore platforms, Energy Conversion & Managment, Vol. 38, N° 15 - 17, 1997, pp. 1577 - 1584.
- [47] Sciubba, E., Using exergy to evaluate environmental externalities, Dept. of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Rome "La Sapienza", Rome, Italy, 10 pp.
- [48] Sciubba, E., Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and desing of thermal systems, Exergy - An International Journal, Vol. 1, 2001, N° 1 - 4, pp. 68 - 84.
- [49] Fires, V., Simmang, C., Termodinámica, Editorial Uthea, ISBN: 968-438-029-1, México, 1982, 668 pp.
- [50] Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbot, M. M., Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, McGraw-Hill, Quinta edición en español, México, 1997, 857 pp.

- [51] Gouy, M., Sur l'énergie utilisable, *Journal de physique*, 2e série, Vol. 8, 1889, pp. 501-518.
- [52] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., *Thermal design & optimization*, Wiley-Interscience, First edition, ISBN: 0471584673, 560 pp.
- [53] Tsatsaronis, G., Pisa, J., *Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems: application to the CGAM problem*, Center of Electric Energy, Tennessee Technological University, Cookeville, Tennessee, USA.
- [54] Yehia M. El-Sayed, *The thermoeconomics of energy conversions*, Elsevier, First Edition, 2003, UK.
- [55] Rivero, R., *The exergoecologic improvement potencial of industrial processes, Thermodynamic analysis and improvement of energy systems*, World Publishing Corporation, Beijing, China, 1997, pp. 299 - 304.
- [56] Del Rio, R., Rivero, R., *The role of exergy in the technological strategy of a petroleum refining company - Towards a sustainable development*, Proceedings of the International Conference ECOS 98, Nancy, France, 1998, pp. 349 - 356.
- [57] Rivero, R., *Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation*, *Energy*, Vol. 26, 2001, pp. 561 - 593.
- [58] Rivero, R., *Programas integrales de ahorro de energía (exergia) en la industria petrolera*, *Revista del IMIQ*, Año XXXVII, Vol. 3 - 4, Marzo - Abril 1996, pp. 26 - 30.
- [59] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Proyecto D.000018 "Investigación y desarrollo tecnológico de procesos de destilación diabática", Jefe de proyecto: Dr. Ricardo Rivero Rodríguez, Grupo de Exergia, PIMAS, México, 2003.
- [60] Rivero, R., *Energy optimization of a refinery by the exergy method*, In: Proceedings of 5th Mediterranean Congress on Chemical Engineering, Vol. II, Sociedad Española de Química Industrial - Expoquimia, Barcelona, España, 1990, pp. 316 - 317.
- [61] Rivero, R., Cachot, T., LeGoff, P., *Exergy analysis of adiabatic and diabatic distillation columns: an experimental study*, In: Paliavachi P. A., Editor, *Energy efficiency in process technology*, ISBN: 1-85861-019-2, London, United Kingdom, Elsevier Applied Science Publisher Ltd., 1993, pp. 1254 - 1267.
- [62] Hernández, J., Rendón, C., García, M., Monroy, L., *Exergoeconomic analysis of a Refinery's gasoline pool*, In Proceedings of the 19th World Energy Congress, Sydney, Australia, World Energy Council's Global Energy Information (GEIS), 2004, 12 pp, disponible en internet: www.worldenergy.org/wec-geis/congress/papers/hernandez0904ys.pdf
- [63] Rivero, R., Hernández, R., Ortega, A., Barrios, H., *Análisis exergoeconómico de un sistema de cogeneración*, Proceedings of IV Pacific Area Chem. Eng. Cong., PACHEC'88, Acapulco: Interamerican Conference Chem. Eng., Asia-Pacific Conf. Chem. Eng., 1998, 10 pp.
- [64] Hernández, J., Heard, C., Rivero, R., *Exergoeconomic comparison of a combined cycle cogeneration system with absorption refrigeration turbina inlet air cooling*, Proceedings of the Internacional Conference ECOS'2003, Vol. II, June 30 - July 1, 2003, ISBN: 87-7475-297-9, Copenhagen, Denmark, pp. 793 - 800.
- [65] Kehlhofer, R., *Combined-cycle gas & steam turbina power plants*, The Fairmont Press, Inc., ISBN: 0-88173-076-9, USA, 1991, 388 pp.

- [66] Hernández, J., Rendón, C., Pineda, C., Comparación termoeconómica de un sistema de cogeneración aplicando refrigeración por absorción, *Revista del IMIQ*, Volumen 44 (5 - 6), ISSN: 0188-7319, pp. 153 - 159.
- [67] Wall, G., On exergy and sustainable development, Part I: Conditions and concepts, *Exergy - An International Journal*, Elsevier Science, Volume 1, N° 1 - 4, 1997, pp. 128 - 145.
- [68] Gong, M., Wall, G., On exergy and sustainable development, Part II: Indicators and methods, *Exergy - An International Journal*, Elsevier Science, Volume 1, N° 1 - 4, 1997, pp. 217 - 233.
- [69] Eartsvag, I., Mielnik, M., Exergy analysis of the Norwegian Society, *Energy*, Volume 25, N° 10, 2000, pp. 957 - 973.
- [70] Eartsvag, I., Society exergy analysis: a comparison of different societies, *Energy*, Volume 26, N° 3, 2001, pp. 253 - 270.
- [71] Rosen, M. A., Evaluation of the energy utilization efficiency in Canada using energy and exergy analyses, *Energy*, Volume 17, N° 4, 1992, pp. 339 - 350.
- [72] Hammond, G. P., Stapleton, A. J., Exergy analysis of the United Kingdom energy system, *Proceedings of the International Mechanical Engineering Conference, Journal of Power and Energy*, 2001, pp. 141 - 162.
- [73] Iler, A., Gurer, T., Energy and exergy utilization in Turkey during 1995, *Energy*, Volume 23, N° 12, 1998, pp. 1099 - 1106.
- [74] Shaeffer, R., Wirtshafter, M. R., An exergy analysis of the Brazilian economy: from energy production to final energy use, *Energy*, Volume 17, N° 9, 1992, pp. 841 - 855.
- [75] International Energy Agency (IEA), Energy indicators and sustainable development, COP 7, Marrakech, October 29 - November 9, 2001, disponible en Internet: www.iea.org, 13 pp.
- [76] Instituto Nacional de Ecología (INE) e Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), Indicadores de desarrollo sustentable en México, 2000, México, ISBN: 970-13-3015-3, 203 pp.
- [77] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Professional Interest Groups: Life-Cycle Assessment (LCA), disponible en Internet: www.setac.org/htdocs/what_intgrp_lca.html
- [78] Life Cycle Analysis of the total Danish energy system, Final report, Danish Energy Research Programme EFP-94.
- [79] Szargut, J., Analysis of cumulative exergy consumption, *International Journal of Energy Research*, Vol. 11, 1987, pp. 541 - 547.
- [80] Cornelissen, R. L., Ph. D. Thesis (1997), Thermodynamics and sustainable development: The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, University of Twente, The Netherlands, 150 pp.
- [81] Cornelissen, R., Hirs, G., The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, 2002, pp. 1417 - 1424.
- [82] Wall, G., Exergy - a useful concept within resource accounting, Report N° 77 - 42, Institute of Theoretical Physics, Göteborg, Sweden, 1977.
- [83] Rivero, R., Anaya, A., Exergy analysis of industrial processes: energy-economy-ecology, *Latin American Applied Research*, Vol. 27, N° 4, 1997, pp. 191 - 205.
- [84] International Energy Agency, Meeting of the Governing Board at Ministerial Level, 28 - 29 April 2003, Paris, France, disponible en Internet: www.enecho.meti.go.jp/english/international/iea/communique.html

- [85] United Nations, UN Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development, Indicators of Sustainable Development, disponible en Internet: www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/isd.htm
- [86] OLADE-CEPAL-GTZ, Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: Enfoques para la política energética, ISBN: 70-081-1, Quito, Ecuador, Mayo, 1997, 91 pp.
- [87] Bardán, C., Hernández, H., Macías, P., Energía y desarrollo sustentable en México (Diagnóstico y Propuesta), Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República (IILSEN), México, agosto 2004, 98 pp.
- [88] International Energy Agency, IEA Energy Statistics, disponible en Internet: www.iea.org/Textbase/stats/index.asp
- [89] Anuario estadístico de Pemex 2005, Petróleos Mexicanos, México, 2006.
- [90] Prospectiva de Petrolíferos 2005 - 2014, Secretaría de Energía, México, 2006.
- [91] Rodríguez-Padilla, V., Política energética, promesas incumplibles, Energía Hoy, Año 3, N° 27, junio 2006, México, pp. 48, 49.
- [92] Shields, D., Pemex: la reforma petrolera, Editorial Planeta, ISBN: 970-37-0363-1, México, 2005, 159 pp.
- [93] Petróleos Mexicanos, Memoria de labores 2004, disponible en Internet: www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionID=1&catID=237&subcatID=649
- [94] Petróleos Mexicanos, Invertirá Pemex cerca de 21 millones de pesos en refinación durante 2006, Boletín de prensa de la Gerencia Corporativa de Comunicación Social de Petróleos Mexicanos, abril de 2006.
- [95] Prospectiva del Mercado de Gas Natural 2005 - 2014, Secretaría de Energía, México, 2005.
- [96] Martínez-Medina, M., Comienza la reconstrucción de complejos petroquímicos: Una luz al final del túnel, Energía Hoy, Año 3, N° 28, julio 2006, México, pp. 40 - 45.
- [97] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Acerca del IMP, disponible en Internet: www.imp.mx/acerca/
- [98] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Informe de autoevaluación institucional 2005, México, 117 pp.
- [99] Investigación y Desarrollo - Periodismo de Salud, Ciencia y Tecnología, De la investigación al negocio, disponible en Internet: www.invdes.com.mx/cienciay.cfm?publicant=Ene%202003
- [100] Secretaría de Energía, 5° Informe de Labores, septiembre 2005, México, 274 pp.
- [101] Bazán, G., Nava, E., La investigación en hidrocarburos: las realidades y los retos del IMP, Revista Energía a Debate, diciembre 2005, México, disponible en: www.energiaadebate.com.mx/Articulos/dic_2005/gerardo_bazan_navarrete.htm
- [102] Annual Report 2005, Institut français du pétrole (IFP), France, 2006, 65 pp.; disponible en: www.ifp.fr
- [103] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Prospectiva de la investigación y el desarrollo tecnológico del sector petrolero al año 2025, México, 2001, 215 pp.
- [104] Rivero, R., Monroy, L., Análisis exérgico de una torre de destilación diabática para estabilización de Naftas, Memorias de la XXXVIII Convención Nacional del IMIQ, Oaxaca, México, 1998.

- [105] Szargut, J., Styrylska, T., Angenäherte bestimmung der exergie von brennstoffen, Brennstoff-Warme-Kraft, 1964, 16, N° 12, pp. 589 - 596 (Referencia tomada del libro de T. J. Kotas).
- [106] Rivero, R., Rendón, C., Monroy, L., Calculation of the exergy of crude oil mixtures, Proceedings of the International Conference ECOS'98, A. Bejan, M. Feidt, M. J. Moran & G. Tsatsaronis, editors, ISBN: 2-905-267-29-1, Nancy, France, 1998, pp. 211 - 218.
- [107] Informe Anual 2005, Seguridad Salud Protección Ambiental (SISPA), Petróleos Mexicanos, 2006, México, 79 pp.; disponible en Internet: www.pemex.gob.mx
- [108] Balance Nacional de Energía 2004, Secretaría de Energía, 2005, México, 126 pp.
- [109] Instituto Mexicano del Petróleo, Grupo de Exergia, Informe F.00257-C, 45 pp.
- [110] U.S. Department of Energy (DoE), Exergy Analysis: A Powerful Tool for Identifying Process Inefficiencies in the U.S. Chemical Industry, Industrial Technologies Program, Summary Report, December 2004.
- [111] Rivero, R., Exergy simulation of a distillation tower: diabatic rectification column, In: Sciubba, E., Moran, M., editors, 2nd Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century, ISBN: 88-86662-00-9, Roma: Centro Internazionale di Recerca e Calcolo Universitario Scientifico, ASME; 1995, pp. 465 - 476.
- [112] Rivero, R., Coordinador Técnico, Optimización de las instalaciones existentes en la Refinería de Tula, Hidalgo, utilizando el método de análisis de exergia, Reporte Final del Proyecto E-2277, Tomos I a IX, México, Grupo de Exergia, Instituto Mexicano del Petróleo, 1988, 713 pp.
- [113] Instituto Mexicano del Petróleo, Optimización de plantas petroquímicas utilizando el método de exergia, Proyecto E-2292: Planta de Amoniaco, Cosoleacaque, Veracruz, México, Grupo de Exergia, 1989, 111 pp.
- [114] Rivero, R., Investigador en Jefe, Optimización exérgica de un esquema de Refinación, Proyecto E0A-7442, P.00257, F.00257, México, Grupo de Exergia, Instituto Mexicano del Petróleo, 1996 - 2000.
- [115] LeGoff, P., Cachot, T., Rivero, R., Exergy analysis of distillation processes, Chem. Eng. Technol., 19 (1996), 478 - 485.
- [116] Comunicación directa con el Dr. Ricardo Rivero, Instituto Mexicano del Petróleo, 2006.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Derivación Termodinámica del Concepto de Exergía

Considérese un sistema A dentro de un sistema A_0 , asumiendo que sea homogéneo y amplio en comparación a A como aparece en la Figura A.1. El medio ambiente A_0 puede ser caracterizado por sus parámetros intensivos T_0 , p_0 y μ_{i0} (temperatura, presión y potencial químico, respectivamente). Los parámetros correspondientes para A son T , p y μ_i (por el momento A es también asumido como un sistema homogéneo). Los parámetros extensivos para A son U , V , S y n_i (energía interna, volumen, entropía y el número de moles de diferentes elementos químicos, respectivamente). Los parámetros extensivos para A_0 son acordeamente U_0 , V_0 , S_0 y n_{i0} , y se asume por ser amplios en comparación por las cantidades correspondientes a A.

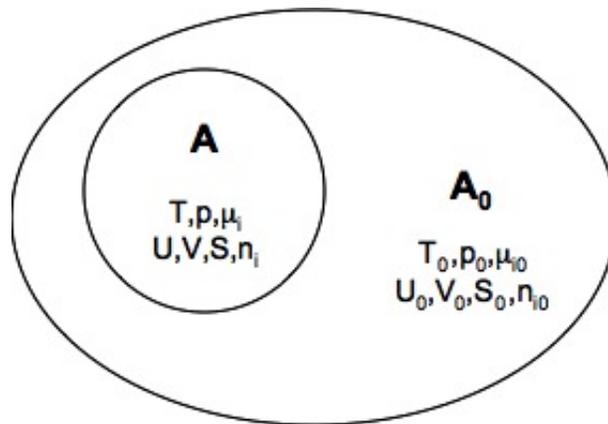


Figura A.1. Sistema A en un medio ambiente A_0 .

El sistema combinado $A + A_0$ se considera por ser un sistema aislado (sin intercambio de materia y energía con los alrededores) a parte de trabajo W extraído de A.

La interfase entre A y A_0 puede tomar lugar en un camino controlado a través de la interfase de A. Puesto que A es pequeño, esto no provoca un cambio de los parámetros intensivos de A_0 , por lo que:

$$\begin{pmatrix} dT_0 = 0 \\ dp_0 = 0 \\ d\mu_{i0} = 0 \end{pmatrix}$$

Considerando éstos parámetros, la entropía diferencial del medio ambiente A_0 es entonces:

$$dS_0 = \frac{1}{T_0} \left(dU_0 + p_0 dV_0 - \sum_i \mu_{i0} dn_{i0} \right) \quad (\text{a.1})$$

En conjunto, la entropía diferencial del sistema y el medio ambiente es por lo tanto:

$$dS^{\text{tot}} = dS + dS_0 = -\frac{1}{T_0} \left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_i \mu_{i0} dn_i \right) - \frac{dW}{T_0} \quad (\text{a.2})$$

En consecuencia, la ecuación a.2 puede escribirse como:

$$dS^{\text{tot}} = -\frac{1}{T_0} (dEx - dW) \quad (\text{a.3})$$

en donde la diferencia de exergía está determinada por dEx ; ésta expresión está denotada por:

$$Ex = U + p_0 V - T_0 S - \sum_i \mu_{i0} n_i \quad (\text{a.4})$$

En este contexto, si consideramos que el valor de la exergía en el equilibrio es cero, entonces encontramos la relación de energía interna del sistema como:

$$U = TS - pV - \sum_i \mu_i n_i \quad (\text{a.5})$$

Ahora bien, relacionando las ecuaciones a.4 y a.5, encontramos que

$$Ex = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_i n_i (\mu_i - \mu_{i0}) \quad (\text{a.6})$$

por lo que demuestra que la exergía en el equilibrio es inexistente al encontrarse los parámetros de temperatura, presión y composición con el medio ambiente de referencia ($T = T_0$, $p = p_0$ y $\mu_i = \mu_{i0}$)

Durante el proceso, a través del cual la exergía alcanza el equilibrio por medio del cambio $-Ex$ (de Ex a 0), entonces la integración de la ecuación a.3 resulta como:

$$\Delta S^{\text{tot}} = -\frac{1}{T_0} (-Ex + W) \quad (\text{a.7})$$

o

$$W = Ex - T_0 \Delta S^{\text{tot}} \quad (\text{a.8})$$

Considerando el enunciado de la segunda ley de la termodinámica, en donde la diferencia de entropía en un sistema es mayor a cero para un proceso real ($\Delta S_{\text{tot}} \geq 0$), y siendo $\Delta S_{\text{tot}} = 0$ en un proceso reversible, tenemos que

$$W \leq Ex \quad (\text{a.9})$$

Como resultado, la exergía Ex es la cantidad máxima de trabajo que puede ser extraído del sistema A para alcanzar el equilibrio con su medio ambiente A_0 .

Ahora bien, si se considera el estado de equilibrio en la ecuación a.4, se puede obtener entonces:

$$Ex = U - U_{\text{eq}} + p_0(V - V_{\text{eq}}) - T_0(S - S_{\text{eq}}) - \sum_i \mu_{i0}(n_i - n_{i\text{eq}}) \quad (\text{a.10})$$

En este contexto, usando la ecuación de la primera ley de la termodinámica en equilibrio con el medio ambiente de referencia como sigue

$$H - H_{\text{eq}} = U - U_{\text{eq}} + p_0(V - V_{\text{eq}}) \quad (\text{a.11})$$

y simplificando en la ecuación a.10, se obtiene:

$$Ex = H - H_{\text{eq}} - T_0(S - S_{\text{eq}}) - \sum_i \mu_{i0}(n_i - n_{i\text{eq}}) \quad (\text{a.12})$$

Finalmente, siendo el estado de equilibrio la referencia con el medio ambiente "0" y sin existir cambio en la concentración del sistema, la exergía se define acorde a la siguiente ecuación:

$$Ex = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (\text{a.13})$$

Esta es la ecuación general para la evaluación práctica de la exergía.

APÉNDICE B. Derivación Termodinámica de las Pérdidas de Exergia

Las pérdidas de exergia pueden ser calculadas usando el modelo de la Figura B.1. El estado constante del proceso irreversible es suministrado con la aportación de exergia, la cual contiene entalpía H_1 y entropía S_1 . Los parámetros correspondientes a la salida son H_2 y S_2 . El proceso también puede ser suministrado con calor Q_1 tomado de una fuente térmica con temperatura T_1 . El calor desechado Q_0 es transferido a los alrededores, que comúnmente se considera como el medio ambiente expresado como la referencia "0". El efecto útil del proceso puede ser trabajo mecánico W o un producto que tenga los parámetros H_u y S_u . El segundo caso será analizado asumiendo efectos insignificantes de energía cinética y energía potencial.

El efecto de irreversibilidad puede ser obtenido por comparar un proceso reversible con un proceso actual que se encuentre operando con los mismos parámetros y cantidades de exergia, y a su vez, con la misma cantidad de calor. El proceso reversible aportará una gran cantidad de productos expresada como $H_{u(\text{rev})}$ y $S_{u(\text{rev})}$, y una pequeña cantidad de calor de desecho $Q_{0(\text{rev})}$. De tal manera, las ecuaciones de balance serán:

$$H_u = H_1 - H_2 + Q_1 - Q_0 \quad (\text{b.1})$$

o

$$H_{u(\text{rev})} = H_1 - H_2 + Q_1 - Q_{0(\text{rev})} \quad (\text{b.2})$$

Relacionando la ecuación b.1 y b.2, se obtiene:

$$H_{u(\text{rev})} - H_u = Q_0 - Q_{0(\text{rev})} \quad (\text{b.3})$$

El incremento del efecto útil de la comparación del proceso reversible es acompañado por el decremento de la cantidad de $Q_{0(\text{rev})}$ o calor de desecho. La suma de la diferencia de entropía de los cuerpos, que toma parte en el proceso real, es dado por:

$$\sum \Delta S = -\frac{Q_1}{T_1} + S_2 - S_1 + \frac{Q_0}{T_0} + S_u \quad (\text{b.4})$$

De tal manera, para el proceso reversible comparativo se tiene:

$$0 = -\frac{Q_1}{T_1} + S_2 - S_1 + \frac{Q_{0(\text{rev})}}{T_0} + S_u \quad (\text{b.5})$$

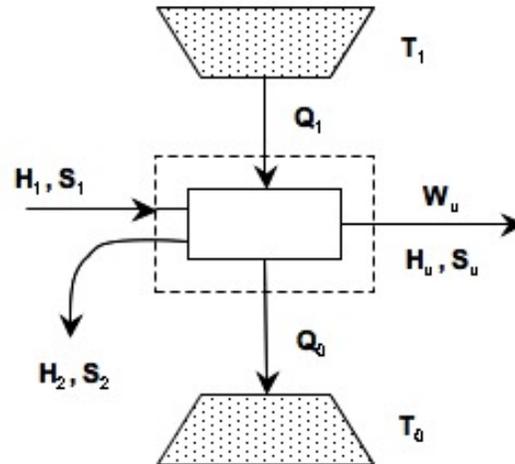


Figura B.1. Esquema de las corrientes de un proceso.

Combinando la ecuación b.4 y b.5 se obtiene el calor neto suministrado,

$$Q_0 - Q_{0(\text{rev})} = T_0 \left(\sum \Delta S + S_{u(\text{rev})} - S_u \right) \quad (\text{b.6})$$

y sustituyendo la ecuación b.3 en b.6, se tendrá:

$$H_{u(\text{rev})} - H_u - T_0 (S_{u(\text{rev})} - S_u) = T_0 \sum \Delta S \quad (\text{b.7})$$

El lado izquierdo de la ecuación b.7 representa la diferencia de la exergía térmica útil en el proceso reversible y actual. Esto expresa, por consiguiente, la pérdida de exergía debido a las irreversibilidades del proceso bajo consideración,

$$I_{\text{rr}} = T_0 \sum \Delta S \quad (\text{b.8})$$

Esta ecuación es conocida como el Teorema de Gouy-Stodola.

APÉNDICE C. Análisis de Exergia de una Caldera de Vapor

Aquí se presenta el análisis de exergia de una caldera de vapor para la generación de vapor a 423 °C. El combustible utilizado es Combustóleo N° 6, el cual presenta la siguiente composición: 0.8467 Carbón, 0.1102 Hidrógeno, 0.0038 Oxígeno, 0.0018 Nitrógeno, 0.0397 Azufre, 0.0002 Cenizas. El combustóleo se alimenta a la caldera con un flujo de 3,580 kg/h y 45,035 kg/h de agua condensada a 96 °C. Las condiciones ambientales se reportan de la siguiente manera: 27.75% humedad, 13 °C temperatura de bulbo seco, 35 °C temperatura de bulbo húmedo y 25 °C temperatura del aire. La caldera trabaja con un exceso de aire del 30%.

Flujo de proceso.

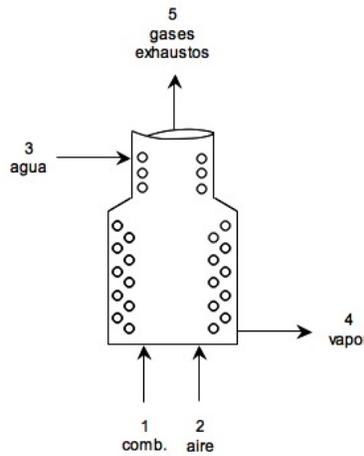


Figura C.1 Esquema general de una caldera de vapor.

Composición de los gases de combustión.

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂	Total
n_k (kmol/kg _{comb})	0.07177	0.0605	0.4835	0.0298	0.00124	0.6473
X_k	0.1108	0.0934	0.7468	0.046	0.00192	1.0

Temperatura de flama adiabática.

Como el combustóleo y el aire atmosférico entran a la etapa de combustión adiabática a T_0 y p_0 , el balance de energía se expresa como:

$$m_F(\text{NCV}^0) = \sum n_k h_{\text{ph},k} = (\theta_2 - \theta^0) \sum n_k C_{p,k}^h$$

La suma $\sum n_k C_{p,k}^h$ puede ser determinada de los valores de $C_{p,k}^h$ de la Tabla D.1 (página 271) de la referencia [32] para un valor determinado de θ_2 . Seguido de esto, se inicia un proceso iterativo hasta encontrar el valor de temperatura adiabática

Valores de $C_{p,k}^h$ a $\theta_2 = 1,900 \text{ K}$

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
$C_{p,k}^h$ (kJ/kmol K)	54.56	42.27	33.30	34.77	53.63

$$\sum n_k C_{p,k}^h = 23.7 \text{ kJ/K} \quad (\text{NCV}^0) = 40,723.54 \text{ kJ/kg}$$

$$\theta_2 = 25 + \frac{40,723.54}{23.7} = 1,908.07 \text{ }^\circ\text{C}$$

A partir de éste valor de θ_2 , no más iteraciones son requeridas.

Balance de exergia.

$$\begin{aligned} \text{Irr}_1 &= E_{x_c} - E_{x_g} \\ E_{x_c} &= m_F (\epsilon^0_F) \quad \epsilon^0_F = 43,583.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$E_{x_c} = (1 \text{ kg}_{\text{comb}})(43,583.3 \text{ kJ/kg}) = 43,583.3 \text{ kJ}$$

$$E_{x_g} = n_p \epsilon_{p_g}^0 + \sum n_k \epsilon_{\text{ph},k} \quad \epsilon_{p_g}^0 = \sum \chi_k \epsilon_k^0 + RT_0 \sum \chi_k (\text{Ln}(\chi_k))$$

De la Tabla A.3 (página 242) de la referencia [32], se obtiene la exergia química estándar ϵ^0 .

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
ϵ^0 (kJ/kmol)	20,140	11,710	720	3,970	303,500

$$\sum \chi_k \epsilon_k^0 = 4,628.26 \text{ kJ/kmol}$$

$$RT_0 \sum \chi_k (\text{Ln}(\chi_k)) = (8.1343)(298.15)(-0.8368) = -2,074.56 \text{ kJ/kmol}$$

$$\epsilon_{pg}^0 = 4,628.26 - 2,074.56 = 2,553.69 \text{ kJe/kmol}$$

$$\sum n_k \epsilon_{ph,k} = (\theta_2 - \theta^0) \sum n_k Cp_k^\epsilon$$

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
Cp ^ε (kJ/kmol K)	38.44	29.56	23.16	24.19	37.58

$$\sum n_k \epsilon_{ph,k} = (1,908.07 - 25)(16.512) = 31,094.26 \text{ kJe}$$

$$Ex_g = (0.6739)(2,553.69) + 31,094.26 = 32,747.5 \text{ kJe}$$

$$Irr_1 = 43,583.3 - 31,094.26 = 10,835.79 \text{ kJe por cada kg}_{comb} \quad \leftarrow \text{ por combustión}$$

$$\text{siendo } F_1 = 3,579.36 \text{ kg/h}$$

$$Irr_1 = (10,835.79 \text{ kJ/kg}_{comb})(3,579.36 \text{ kg/h}) = 10,773.66 \text{ kWe}$$

$$Ex_1 = (43,583.3 \text{ kJ/kg})(3,579.36 \text{ kg/h}) = 43,333.42 \text{ kWe}$$

Balace de energía.

$$H_2 - H_3 = m_{agua}(H_{S4} - H_{W3}) \qquad H_3 = (\theta_3 - \theta^0) \sum n_k Cp_k^h$$

$$H_2 = 23.7 (1,908.07 - 25) = 44,628.75 \text{ kJ/kg}$$

Con acercamiento de 100 °C para los gases exhaustos y la entrada del agua (θ₃ = 196 °C ≈ 200 °C)

$$H_3 = (200 - 25)(20.27) = 3,547.54 \text{ kJ/kg}$$

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
Cp ^h (kJ/kmol K)	41.52	33.93	29.59	29.50	42.88

$$H_{S3} = 3,236.7 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{W4} = 401.33 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{\text{agua}} = \frac{44,628.75 - 3,547.54}{3,236.7 - 401.33} = 14.48 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{comb}}$$

$$(14.48 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{comb}})(3,579.36 \text{ kg}_{\text{comb}}/\text{h}) = 51,829.13 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{h}$$

es la cantidad de vapor que se podría generar, sin embargo el proceso ocupa el 86.89% del combustible, el cual proviene de:

$$\frac{45,035}{51,829.13} = 0.8689 \quad 86.89\% \text{ por el uso de combustible}$$

$$\text{Irr}_2 = (E_{X_2} - E_{X_3}) - (E_{X_{S3}} - E_{X_{W4}})$$

$$S_{S3} = 6.6244 \text{ kJ/kg K} \quad \text{y} \quad S_{W4} = 1.2605 \text{ kJ/kg K}$$

$$E_{X_{S3}} - E_{X_{W4}} = (14.48)(0.8689)[(3,236.7 - 401.33) - 298.15(6.6244 - 1.2606)]$$

$$E_{X_{S3}} - E_{X_{W4}} = 15,348.05 \text{ kJ}$$

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
C _p ^ε (kJ/kmol K)	41.52	33.93	29.59	29.50	42.88

$$(E_{\text{ph}})_5 = (\theta_5 - \theta^0) \sum n_k C_{p_k}^{\epsilon}$$

$$(E_{\text{ph}})_5 = (200 - 25)(4.365) = 762.71 \text{ kJ}$$

$$E_{X_5} = E_{X_5^0} + (E_{\text{ph}})_5$$

$$E_{X_5} = (0.6473)(2,553.69) + 762.71 = 2,415.71 \text{ kJ}$$

$$\text{Irr}_2 = (32,747.71 - 2,415.71) - 15,348.05 = 14,983.94 \text{ kJ}$$

Irr₂ son las irreversibilidades por transferencia de calor

$$\text{Irr}_3 = 2,415.71 \text{ kJ}$$

Irr₃ son las irreversibilidades por mezcla al ambiente

Efectividad exérgica:

$$\varepsilon_{\text{ex}} = \frac{15,348.05}{43,583.3} = 0.3521 \quad 35.21\% \text{ de efectividad}$$

Eficiencia del combustible:

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{(14.48)(0.8689)(3,236.7 - 401.33)}{40,723.54} = 0.8758 \quad 87.58\% \text{ de eficiencia}$$

Balance general de exergia.

$$EX_C = 43,333.42 \text{ kWe}$$

$$EX_2 = 0 \text{ kWe}$$

$$EX_3 = 582.81 \text{ kWe}$$

$$EX_4 = 15,930.76 \text{ kWe}$$

$$EX_5 = (2,415.71 \text{ kJ/kg})(3,579.36 \text{ kg/h}) = 2,401.85 \text{ kWe}$$

$$EX_{\text{in}} = EX_C + EX_2 + EX_3$$

$$EX_{\text{in}} = 43,333.42 + 0 + 582.81 = 43,916.23 \text{ kWe}$$

$$EX_{\text{out}} = EX_4 + EX_5$$

$$EX_{\text{out}} = 15,930.76 + 2,401.85 = 18,332.61 \text{ kWe}$$

$$Irr_{C1} = EX_{\text{in}} - EX_{\text{out}}$$

$$Irr_{C1} = 43,916.23 - 18,332.61 = 25,583.62 \text{ kWe}$$

Por lo tanto, la eficiencia exérgica del proceso será:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{18,332.61}{43,916.23} = 0.4174 \quad 41.74\% \text{ de eficiencia exérgica de la caldera}$$

El potencial de mejoramiento de la caldera se calcula por medio de:

$$\text{Pot} = \text{Irr}_{\text{Cl}}(1 - \varepsilon_{\text{ex}}) + \text{Ex}_5$$

$$\text{Pot} = (25,583.62)(1 - 0.3521) + 2,401.85 = 18,977.47 \text{ kWe}$$

APÉNDICE D. Análisis de Exergia del Sistema Nacional de Refinación

Aquí, se presenta el análisis de exergia del Sistema Nacional de Refinación mexicano. Los datos presentados son calculados a partir de los trabajos realizados por los investigadores del Grupo de Exergia, y dirigidos por el Prof. Ricardo Rivero, del Instituto Mexicano del Petróleo [109].

Inicialmente, los investigadores del IMP presentaron los análisis de exergia de las refinerías de Cadereyta y Madero reconfiguradas, y aquí se hizo un factor de escalamiento a partir de la capacidad de producción de cada refinería para calcular el valor de los parámetros exérgicos. Los valores corresponden a la capacidad de refinación del año 2004.

Refinería	Irr (MWe)	Ex _{fl} (MWe)	Pex (MWe)	Efectividad	Pot (MWe)
Cadereyta	22,885.21	3,886.53	26,772.44	0.1265	23,876.17
Madero	21,426.89	1,658.53	23,084.04	0.1227	20,456.79
Minatitlán	21,895.71	2,374.79	24,269.79	0.1240	21,556.06
Salamanca	22,578.42	3,417.82	25,996.51	0.1258	23,156.84
Salina Cruz	24,507.72	6,365.39	30,876.13	0.1303	27,680.55
Tula	22,594.14	6,497.42	31,094.70	0.1305	27,883.18
Total PR :	137,888.09	24,200.47	162,093.61	0.1268	144,609.59

Tabla D.1 Parámetros exérgicos del Sistema Nacional de Refinación al año 2004.

El análisis de exergia de las refinerías de Cadereyta y Madero fue desarrollado utilizando el simulador de procesos Aspen Plus[®] de AspenTech, en el cual, los investigadores del IMP desarrollaron rutinas de cálculo especializadas para la obtención de las exergias físicas y químicas de cada una de las plantas analizadas.

En comparación con los datos presentados en la Tabla 6.3 (Capítulo VI), aquí se muestran valores muy superiores debido a que en éste análisis se consideraron las exergias físicas de las corrientes de cada planta y utilizando herramientas sofisticadas como programas de cómputo especializado.

APÉNDICE E. Emisiones y Consumo de Energía de Pemex.

A continuación se presentan los datos de emisiones de gases efecto invernadero (SO_x, NO_x y CO₂). Asimismo, se presentan los consumos de energía y de quema y desfogue. Todos los datos publicados pertenecen a los reportados por Pemex para el año 2004 [107].

	SO _x		NO _x		CO ₂		Cons. Energía		Quema y desfogue	
	mil ton	%	mil ton	%	mmton	%	mmbpce	%	mmbpce	%
TOTAL :	513.402		100.297		38.42		107.14		11.93	
Pemex Exploración y Producción (PEP)										
Región Norte	5.302	8.6	5.235	10.5	1.11	11.0	2.82	10.0	1.23	12.4
Región Sur	7.321	11.8	11.332	22.8	2.67	26.6	7.86	28.0	1.09	11.0
Región Marina Noroeste	42.954	69.6	10.306	20.8	3.91	38.9	10.57	37.7	6.44	64.9
Región Marina Suroeste	3.529	5.7	6.604	13.3	1.56	15.5	4.92	17.5	1.15	11.6
Unidad perf. y mtto pozos	2.614	4.2	16.057	32.4	0.78	7.7	1.83	6.5	0.00	0.00
Total PEP :	61.720		49.534		10.03		28.00		9.91	
Pemex Refinación (PR)										
Madero	56.979	13.7	3.636	10.6	2.43	15.0	6.92	15.5	0.42	23.8
Minatitlán	38.031	9.2	3.324	9.7	1.79	11.1	4.81	10.8	0.36	20.4
Salina Cruz	108.323	26.1	6.151	17.9	3.06	18.9	7.73	17.3	0.56	31.8
Salamanca	46.408	11.2	4.610	13.4	2.47	15.3	6.18	13.8	0.12	6.8
Cadereyta	35.828	8.6	3.450	10.0	2.06	12.7	6.00	13.4	0.04	2.2
Tula	122.248	29.5	6.325	18.4	3.31	20.5	9.15	20.5	0.26	14.7
Almacenamiento y distribución	6.023	1.4	6.821	19.8	1.00	6.2	3.71	8.3	0.00	0.00
Total PR :	413.840		34.317		16.12		44.50		1.76	
Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)										
Coatzacoalcos	0.29	0.08	0.427	4.6	0.23	3.7	0.81	5.0	0.00	0.00
Arenque	0.695	2.0	0.01	0.01	0.01	0.1	0.04	0.2	0.00	0.00
Burgos	0.00	0.00	0.176	1.9	0.07	1.1	0.24	1.5	0.00	0.00
Cactus	5.442	15.7	2.046	22.1	1.98	32.3	4.21	26.2	0.01	6.67
Ciudad Pemex	8.372	24.2	1.655	17.9	0.91	14.8	1.98	12.3	0.00	0.00
La Venta	0.00	0.00	0.629	6.8	0.18	2.9	0.65	4.0	0.00	0.00
Matapionche	8.943	25.9	0.059	0.64	0.10	1.6	0.24	1.5	0.00	0.00
Nuevo Pemex	7.387	21.4	2.561	27.7	1.98	32.3	5.60	34.8	0.02	13.3
Poza Rica	3.611	10.4	0.720	7.7	0.29	4.7	0.83	5.17	0.03	20.0
Reynosa	0.01	0.00	0.381	4.1	0.17	2.7	0.71	4.4	0.02	13.3
Terminales de gas	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.04	0.2	0.00	0.00
Ductos	0.07	0.02	0.585	6.3	0.20	3.2	0.70	4.3	0.07	46.6
Total PGPB :	34.487		9.245		6.12		16.05		0.15	

	Continuación.....									
	SOx		NOx		CO ₂		Cons. Energía		Quema y desfogue	
	mil ton	%	mil ton	%	mmton	%	mmbpce	%	mmbpce	%
Pemex Petroquímica (PPQ)										
Morelos	0.136	4.0	1.766	24.6	1.60	26.0	4.92	26.4	0.07	63.6
Cangrejera	0.045	1.3	2.988	41.5	2.72	44.2	10.02	53.9	0.03	27.2
Cosoleacaque	0.03	0.09	1.089	15.1	1.20	19.5	1.71	9.2	0.00	0.00
Pajaritos	0.01	0.03	0.617	8.5	0.26	4.2	0.90	4.8	0.00	0.00
Tula	0.00	0.00	0.030	0.42	0.05	0.81	0.17	0.9	0.00	0.00
Escolín	0.00	0.00	0.204	2.8	0.08	1.3	0.28	1.5	0.00	0.00
Camargo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Independencia	3.170	94.5	0.497	6.9	0.24	3.9	0.59	3.1	0.01	9.1
Total PPQ:	3.355		7.201		6.15		18.59		0.11	

Tabla E.1 Emisión de gases y consumo de energía de Pemex.

APÉNDICE F. Desarrollo de Indicadores de Sustentabilidad Exérgica.

En este apéndice se presenta la metodología de cálculo de cada uno de los Indicadores de Sustentabilidad Exérgica (ISEx). Los datos que se consideraron para realizar los cálculos corresponden a los publicados por Pemex y los resultados del análisis de exergia aquí desarrollado.

F.1 Autarquía exérgica.

El cálculo del indicador de autarquía exérgica se da por la siguiente relación:

$$(\text{Producción de exergia total} / \text{Oferta exérgica}) = \text{Autarquía exérgica}$$

donde

$$\text{Oferta exérgica} = \text{Producción exergia total} + \text{Importaciones.}$$

Normalización		Indicador de sustentabilidad			
0 = 100 % 1 = 0 %		Alto indicador se relaciona con la baja participación de la importaciones en la oferta exérgica.			

	Producción exergia total (MWe)	Importaciones (MWe)	Oferta exérgica (MWe)	Relación imp/prod. (%)	Autarquía exérgica
PEP ^a	178,640	2,680	181,320	1.50	0.9852
PR	93,970	8,768	102,738	9.33	0.9147
PGPB	53,810	8,866	62,676	16.47	0.8585
PPQ	16,770	40.18	16,810	0.23	0.9976
Total Pemex	164,550	20,355	184,905	12.37	0.8899

a. No se consideran exportaciones de petróleo crudo.

La normalización es un grado del nivel de sustentabilidad que va de 1 a 0, entre más cercano a 1, es más sustentable. El criterio del nivel de sustentabilidad de la autarquía exérgica se da por los siguientes parámetros:

Indicador autarquía exérgica	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.2 Intensidad exérgica.

La intensidad exérgica es la relación de la producción de exergía entre los ingresos (en Musd).

La normalización del indicador de intensidad exérgica se establece por los parámetros del nivel de sustentabilidad. Aquí se establece que tendrá un parámetro 0 de sustentabilidad cuando la producción de exergía sea mayor o igual a 10 MWe por cada Musd de ingreso, y tendrá un parámetro 1 de sustentabilidad cuando la producción de exergía sea menor o igual a 1 MWe por cada Musd de ingreso.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 10 MWe/MUSD 1 = 1 MWe/MUSD	$Y = X / 10$	Alto indicador se relaciona con la baja productividad y una competitividad económica reducida de la empresa. Significa que su economía está expuesta a los riesgos derivados de las fluctuaciones de los precios de los energéticos.

donde Y corresponde al indicador normalizado y X a la intensidad exérgica (MWe/MUSD).

	Producción exergía (MWe)	Ingresos ^a (M pesos)	Ingresos (MUSD) ^b	Intensidad exérgica (MWe/MUSD)	Normalización
PEP	323,950	545,609	47,444	6.8280	0.6828
PR	93,970	281,507	24,478	3.8388	0.3839
PGPB	53,810	179,104	15,574	3.4551	0.3455
PPQ	16,770	25,667	2,231	7.5136	0.7514
Total Pemex	309,860	1'031,887	89,729	3.4533	0.3453

a. Ingresos reportados al año 2004 por concepto de venta de productos por cada subsidiaria. Referencias [89,93].

b. Se considera un tipo de cambio de 11.5 pesos/usd.

Entonces, el nivel de sustentabilidad del indicador de intensidad exérgica normalizado será de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador intensidad exérgica	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Bajo
0.61 - 0.80	Medio Bajo
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Alto
0 - 0.20	Alto

F.3 Fortalecimiento de la calidad energética.

El fortalecimiento de la calidad energética se expresa como la relación entre la cantidad de exergia de exportación y el gasto de inversión (en Musd).

La normalización consiste en que se tendrá un índice 0 de sustentabilidad del fortalecimiento de la calidad energética cuando la exportación de exergia sea mayor o igual a 100 MWe por cada Musd invertido, y tendrá un índice de 1 cuando se exporte menor o igual a 1 MWe por cada Musd invertido.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 100 MWe/Musd 1 = 1 MWe/Musd	$Y = X / 100$	Un bajo indicador se relaciona con la baja participación de la exergia exportada para contribuir al gasto de inversión en el propio sector.

De la ecuación de normalización, Y corresponde al indicador normalizado y X al fortalecimiento de la calidad energética (FCE) en MWe/Musd.

	Exportación (MWe)	Ingresos (Musd)	Inversión (Musd)	FCE (MWe/Musd)	Normalización
PEP	145,310	47,444	10,061	14.44	0.1444
PR	6,090	24,478	452	13.47	0.1347
PGPB	5,002	15,574	222	22.53	0.2253
PPQ	610	2,231	142	4.29	0.0430
Total Pemex	157,013	89,729	10,877	14.43	0.1443

Entonces, el nivel de sustentabilidad del indicador de fortalecimiento de la calidad energética normalizado será de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador de fortalecimiento de la calidad energética	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.4 Pureza de uso exérgico.

La pureza de uso exérgico se calcula como sigue:

$$\text{Pureza} = \text{Emisiones de CO}_2 / \text{Consumo de exergia}$$

El indicador normalizado corresponde al parámetro de sustentabilidad que se ha establecido para pernoctar el grado de sustentabilidad del sector. Se considera un parámetro 0 de sustentabilidad al emitirse 2 mil toneladas de CO₂ por cada MWe de exergia consumida, por el contrario, se considera un parámetro 1 de sustentabilidad al emitirse 1 mil toneladas de CO₂ por cada MWe de exergia consumida. Por ejemplo, PPQ presenta un indicador de pureza de uso exérgico de 1.6357 mil ton/MWe, y en referencia a la normalización establecida, para que PPQ tenga un índice 1 de sustentabilidad tendría que reducir sus emisiones más allá del 50% para lograr su objetivo.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 2 mil ton CO ₂ /MWe 1 = 1 mil ton CO ₂ /MWe	$Y = 2 - X$	Un alto indicador representa un relativo bajo nivel de emisiones de CO ₂ .

De la ecuación de normalización, Y corresponde al indicador normalizado y X a la pureza de uso exérgico en mil ton CO₂/MWe.

	CO ₂ (mil ton)	Consumo exergia (MWe)	Pureza de uso exérgico (mil ton CO ₂ /MWe)	Normalización
PEP	10,030	5,663.03	1.7711	0.2289
PR	16,120	9,000.17	1.7910	0.2089
PGPB	6,120	3,246.13	1.8853	0.1147
PPQ	6,150	3,759.85	1.6357	0.3643
Total Pemex	38,420	21,669.17	1.7730	0.2270

En correspondencia, el nivel de sustentabilidad se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador de pureza de uso exérgico	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.5 Intensidad exérgica de CO₂.

La intensidad exérgica de CO₂ se calcula al considerar el total de emisiones de CO₂ en MWe por cada MWe de producto final.

El indicador normalizado se establece aquí por medio de los niveles máximos permisibles de emisiones de CO₂ (en MWe) por cada MWe de producción exérgica.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 0.006 MWe CO ₂ /MWe 1 = 0 MWe CO ₂ /MWe	$Y = 1 - 1.666 * (100X)$	Un bajo indicador representa una alta vinculación de emisiones de CO ₂ (en MWe) por cada MWe producido.

De la ecuación de normalización, Y corresponde al indicador normalizado y X a la intensidad exérgica de CO₂.

	CO ₂ (mil ton)	CO ₂ (MWe)	Producción exergia (MWe)	Intensidad exérgica CO ₂	Normalización
PEP	10,030	143.60	323,950	0.000443	0.9261
PR	16,120	230.79	93,970	0.002455	0.5907
PGPB	6,120	87.62	53,810	0.001628	0.7286
PPQ	6,150	88.05	16,770	0.005250	0.1250
Total Pemex	38,420	550.05	309,860^a	0.001775	0.7041

a. No se consideran las exportaciones de petróleo crudo por parte de PEP.

En correspondencia, el nivel de sustentabilidad se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador de intensidad exérgica de CO ₂	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.6 Pérdida exérgica vinculada a productos.

Este indicador es una relación entre el parámetro de las pérdidas totales de exergía (Pex) entre la producción de exergía total (productos finales).

Aquí se estableció que un índice 0 de sustentabilidad corresponde a la cantidad de pérdidas de exergía de 0.3 MWe por cada MWe de producto final, y de 1 a la cantidad de pérdidas de exergía de 0.001 MWe por cada MWe de producto final. A partir de allí, se determina la ecuación de normalización del indicador para identificar de una escala de 0 a 1 el nivel de sustentabilidad.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 0.3 MWe/MWe 1 = 0.01 MWe/MWe	$Y = 1.0344 - 3.4482 X$	Un alto indicador representa una alta vinculación de las pérdidas de exergía sobre la exergía producida.

	Pérdidas de exergía (MWe)	Producción de exergía (MWe)	PexVP	Normalización
PEP	50,692	323,950	0.1565	0.4948
PR	6,958	93,970	0.0740	0.7791
PGPB	3,092	53,810	0.0575	0.8362
PPQ	4,735	16,770	0.2824	0.0607
Total Pemex	65,479	309,860	0.2113	0.3057

En correspondencia, el nivel de sustentabilidad se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador de PexVP	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.7 Consumo exérgico.

Este indicador se determina al dividir el consumo de exergía entre la producción de exergía total.

La normalización consiste en proporcionar un índice de sustentabilidad al considerarse los niveles máximos y mínimos de consumo exérgico. Aquí se establece como máximo la cantidad de 0.3 MWe consumidos por cada MWe de producto final, y como mínimo a 0 MWe consumidos por cada MWe de producto final.

Normalización	Ecuación de normalización	Indicador de sustentabilidad
0 = 0.3 MWe/MWe 1 = 0 MWe/MWe	$Y = 1 - 3.333 X$	Un alto indicador se relaciona con el grado de dependencia exérgica para lograr la transformación de los productos.

De la ecuación de normalización, Y corresponde al indicador normalizado y X al indicador de consumo exérgico (ICEx).

	Producción exergía (MWe)	Consumo exergía (MWe)	ICEx	Normalización
PEP	323,950	5,663.03	0.0175	0.9417
PR	93,970	9,000.17	0.0958	0.6807
PGPB	53,810	3,246.13	0.0603	0.7989
PPQ	16,770	3,759.85	0.2242	0.2527
Total Pemex	309,860	21,669.17	0.0699	0.7669

En correspondencia, el nivel de sustentabilidad se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Indicador de PexVP	Nivel de sustentabilidad
1 - 0.81	Alto
0.61 - 0.80	Medio Alto
0.41 - 0.60	Medio
0.21 - 0.40	Medio Bajo
0 - 0.20	Bajo

F.8 Uso efectivo de calidad energética.

Este indicador es implícito al parámetro de efectividad exérgica (ϵ) calculado en análisis de exergía desarrollado al sector.

Normalización		Indicador de sustentabilidad	
0 = 0 % 1 = 100 %		Una baja efectividad exérgica representa la baja capacidad del sistema para lograr el efecto deseado.	

Efectividad exérgica		Indicador normalizado	Nivel de sustentabilidad
		1 - 0.81	Alto
PEP	0.0820	0.61 - 0.80	Medio alto
PR	0.1602	0.41 - 0.60	Medio
PGPB	0.0499	0.21 - 0.40	Medio bajo
PPQ	0.2658	0 - 0.20	Bajo
Total Pemex	0.0854		

F.9 Mejoramiento germinal.

El indicador de mejoramiento germinal es una ponderación porcentual para identificar cuál de los sistemas requiere su mayor atención para ser optimizado.

Se calcula dividiendo el potencial de mejoramiento del sistema *i* (subsidiaria) entre el potencial de mejoramiento total (Total Pemex).

Normalización		Indicador de sustentabilidad	
Ponderación porcentual		Un bajo indicador se relaciona con la máxima prioridad de realizar una optimización para el mejoramiento del proceso.	

Potencial de mejoramiento (MWe)		%	Normalización
PEP	50,655	0.8038	0.1962
PR	5,898	0.0936	0.9064
PGPB	2,947	0.0468	0.9532
PPQ	3,520	0.0559	0.9441
Total Pemex	63,021		