

01178



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“Análisis del Consumo de Energía en el Sector Industrial  
Mexicano y Comparaciones Internacionales:  
Industrias Siderúrgica y Cementera”**

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de:  
Maestra en Ingeniería  
(Energética)**

**presenta:**

**Leticia Ozawa Meida**

278747



**Directora de Tesis: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo**

**Ciudad Universitaria, D.F., mayo 2000**



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.

Esta tesis se realizó fundamentalmente en el grupo de Energía y Ambiente del Instituto de Ingeniería, con una beca de este Instituto bajo la supervisión y el apoyo de la Dra. Claudia Sheinbaum Pardo. Otra parte importante de este estudio se realizó en el Programa de Análisis de Energía del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley bajo la supervisión de Nathan Martin, Lynn Price y Ernst Worrell con una beca de la Dirección de Intercambio Académico para realizar estancias de investigación para la elaboración de tesis de Posgrado.

## Dedicatorias

Mamá, por tu amor y tu apoyo que me han formado y que me han dado las bases para crecer y vivir.

Papá, por tu ejemplo de fortaleza y tu espíritu de lucha que me han educado y encaminado a lo largo de mi vida.

Keiko, Tae, José Luis, Jenny: por su amor, su apoyo y sus consejos que me han ayudado y sostenido en varias etapas de mi vida.

Aimi, Naoki, Aiko: por sus espontáneas e ingeniosas travesuras que me contagian de una formidable alegría.

Carlos, por ser un ángel de enormes y libres alas que en diversos e intensos instantes compartidos en la espiral me has enseñado a amar la vida, a ser viento, mar y arena.

Ana, porque en cada una de tus palabras encuentro frases de cariño que me guían en mi andar.

Ruth, por tu grandísimo y libre espíritu de solidaridad que me ha acompañado en momentos de alegría, tristeza y confusión.

Ale, por tu extraordinaria confianza en nuestra amistad que la ha fortalecido.

Octavio, por estar cerca en momentos importantes.

Claudia Sheinbaum, por creer en mí y por tu ejemplo que me han permitido lograr metas, hacer realidad sueños y vislumbrar nuevos horizontes.

## Agradecimientos

A la Dra. Claudia Sheinbaum, por el gran apoyo que me has brindado en todo momento, por todo lo que me has enseñado a lo largo de 5 años, por darme la oportunidad de descubrir nuevos horizontes, por tu orientación y supervisión en esta tesis y por tu ejemplo de alegría, entusiasmo y trabajo que nos motiva, tanto en lo académico como en lo personal, a tus estudiantes así como al grupo de Energía y Ambiente. Gracias por permitirme imprimir los borradores y los ejemplares de tesis en el Instituto.

Al Ing. Luis Rodríguez Viqueira, por creer en mí, apoyarme y motivarme para seguir adelante. Por su labor de coordinador de Ingeniería de Sistemas, desde el punto de vista de una becaria.

*To Nathan Martin, for giving me the great opportunity to work as a visiting student at the Energy Analysis Department of Lawrence Berkeley National Laboratory. Thank you for supervising my work during my stay and for tutoring me about the energy efficiency and carbon emissions of the Iron and Steel and Cement Industries. A special thanks for showing me how nice are the people and the places of Berkeley and San Francisco.*

*To Ernst Worrell, for giving me important tutoring for my thesis related to the iron and steel Industry, Cement Industry and the International Comparisons Methodology; I would like to thank you for your comments to the drafts I wrote, for helping me with my doubts, for your always friendly advice.*

*To Lynn Price, for giving me valuable teachings of the industries I worked at my stay, mainly for the iron and steel industry. Thank you for your comments of my drafts, for encouraging me to continue learning on this field.*

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por que me ha permitido formarme profesional y personalmente en sus aulas, en sus bibliotecas, en sus jardines, en sus espacios culturales y deportivos. Por ser una Universidad Pública y libre en su Espíritu.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de desarrollarme en el área de Energía y Ambiente a través del Programa de becas del Instituto y por su apoyo durante mis estudios de maestría.

A la Facultad de Ingeniería, a la División de Estudios de Posgrado, a la maestría en Energética, y principalmente al Dr. Víctor Rodríguez Padilla y a todos mis maestros, por enseñarnos sus conocimientos y darnos una excelente orientación en el campo de la Energía.

A Intercambio Académico de la U.N.A.M., por haberme dado la oportunidad de realizar una estancia de investigación para la elaboración de la presente tesis. Quisiera agradecer principalmente a la Lic. Ethel Villanueva y a la Lic. Teresa Franco por su amabilidad, orientación y ayuda durante mi estancia en Berkeley.

*To the Lawrence Berkeley National Laboratory, to the Environmental Energy Technologies Division, and to the Energy Analysis Department for receiving me as a visiting student; for allowing me to learn and to participate at INEDIS. Thank you for permit me work on the research of my master's degree thesis. A special thanks to Jane Ellen Miller for helping me with the J-1 visa.*

Al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), principalmente al Lic. Rogelio Molotia, por brindarme su apoyo en la búsqueda de información relacionada con la Industria del Cemento para México y para el mundo.

A la Cámara Nacional del Acero, principalmente a la Ing. Magdalena Saldivar, por facilitarnos información bibliográfica relativa a la industria siderúrgica mexicana.

A la Dra. Claudia Sheinbaum, al Ing. Luis Rodríguez Viqueira, al Ing. Jacinto Viqueira, al Dr. Jorge Islas y al Instituto de Ingeniería; por haberme permitido presentar la ponencia "New trends in Industrial Energy Efficiency in Mexico's Iron and Steel Industry" en la 22ª Conferencia Internacional Anual de la IAEE que se llevó a cabo en Roma, Italia en junio de 1999.

Al grupo de Energía y Medio Ambiente; a Oscar (sector residencial), Guillermo (sector transporte y modelos bottom-up), Dionicio (desarrollo sustentable y electricidad), Marisela (modelos de emisiones de carbono), Manuel (análisis económico y financiero), David Morillón (arquitectura bioclimática) y Jorge (captura de carbono); por enseñarme otras áreas importantes e interesantes de la energía y por ayudarme cuando tengo dudas.

A la coordinación de Ingeniería de Sistemas; Liz, Sonia, Mari Rodríguez, Oscar, Ismael, Betty, Margarita, Tomás, David Mejía, Alvaro, Juan Carlos, Héctor, Carla, Nélida, Manuel, Jorge, Eréndira, Gustavo, Dionicio, Guillermo, Mari Saravia, Dra. Claudia, Dr. Juan Pablo Antún, Dr. Servio Guillén, M.I. Eugenio López, Dr. David Morillón, Dra. Angélica Lozano, Dr. Gerardo Sierra; por hacer de esta coordinación, una de las más alegres y unidas del Instituto.

A Diana Song, por tu enorme bondad y amistad, al recibirme en tu casa cuando llegué a Berkeley, por ayudarme a adaptar; por enseñarme a transportarme, vivir y disfrutar de esta ciudad estudiantil y por compartir conmigo numerosos y alegres instantes con tus amigos y tu familia.

*To Dian, for giving me orientation related to the International Comparisons Methodology, for animating me to continue in this field and for keeping my spirit up with your wise and friendly advice.*

*To Paula, for sharing with me the apartment at Bonita Ave., but also, I would like to thank you for your friendship and for the time we enjoyed together talking, going shopping, travelling and biking.*

*To Michael, for the lunch time we share at the deck, for the parties at I-House, for the time we share travelling and for the great discussions of Life at the Engineering School cafeteria.*

*To Antoniette, Anne Sophie, Joseph, May, Dwight, Andy, Katja, Bryan and once again Nathan, Ernst and Lynn. I enjoyed very much all the time we shared together at home, at parties, at bars, at trips, biking, dancing, etc. Living at Berkeley for six months has been one of the happiest experiences (academic and personal) I ever had.*

*Thank you, Bryan, for all the support at the INEDIS database. Thank you, Glenn for all your help with the computers.*

A la Dra. Claudia Sheinbaum, al Dr. Victor Rodríguez Padilla, al Dr. Juan José Ambriz, al Dr. Gustavo Rodríguez Elizarraraz y al Ing. Jacinto Viqueira, por sus valiosos comentarios en la revisión de esta tesis.

A Ana Tsutsumi, por ayudarme en la corrección de estilo.

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>i</b>
<b>Capítulo 1. Metodologías de índices de cambio y Comparaciones Internacionales de eficiencia energética en la Industria Manufacturera</b>	<b>1</b>
1.1 Metodología del análisis de descomposición	2
1.1.1 Consideraciones importantes para los indicadores económicos	6
1.1.2 Cálculo de las emisiones de bióxido de carbono para el sector Industrial	8
1.2 Metodología de Comparaciones Internacionales	12
1.2.1 Niveles de agregación en la metodología de Comparaciones Internacionales	14
1.2.1.1 Nivel agregado	15
1.2.1.2 El nivel desagregado	16
1.2.2 Nivel de eficiencia energética	16
1.3 Descripción de la metodología para la Industria Siderúrgica	19
1.3.1 Fronteras del sistema	19
1.3.2 Metodología del análisis de descomposición	20
1.3.3 Metodología del análisis estructura - eficiencia	23
1.4 Descripción de las metodologías empleadas para la Industria del Cemento	23
1.4.1 Fronteras del sistema	24
1.4.2 Indicadores de la industria del cemento	24
1.4.3 Metodología del análisis de descomposición	25
1.4.4 Metodología del análisis estructura-eficiencia	27
1.5 Conclusiones	28

<b>Capítulo 2</b>	<b>Análisis del consumo energético del sector industrial mexicano</b>	<b>29</b>
2.1	Definiciones del consumo de energía y las fronteras de los sistemas energéticos para el sector industrial	30
2.2	Descripción del consumo final de energía para el sector industrial reportado por el Balance Nacional de Energía	32
2.3	Tendencias históricas del consumo de energía y de las emisiones de bióxido de carbono del sector industrial mexicano	37
2.3.1	Demanda de energía del sector industrial: actividad, estructura e intensidad energética	38
2.3.2	Análisis de descomposición	42
2.3.3	Análisis de las emisiones de carbono	45
2.4	Conclusiones	47
<b>Capítulo 3</b>	<b>Industria siderúrgica</b>	<b>49</b>
3.1	Descripción del proceso de fabricación	50
3.1.1	Preparación del mineral de hierro	51
3.1.1.1	Sinterización	51
3.1.1.2	Peletización	52
3.1.2	Preparación del coque	53
3.1.3	Fabricación del hierro	54
3.1.3.1	Alto horno	54
3.1.3.2	Reducción directa	55
3.1.3.3	Fusión directa o Reducción fusión	57
3.1.4	Fabricación del acero	58
3.1.4.1	Convertidor básico al oxígeno (CBO)	59
3.1.4.2	Horno de hogar abierto	60
3.1.4.3	Horno eléctrico de arco	61
3.1.5	Refinación secundaria	62
3.1.6	Colada	62
3.1.6.1	Por lingotes	62
3.1.6.2	Colada continua	63
3.1.7	Laminación	63
3.1.7.1	Laminación en caliente	63
3.1.7.2	Laminación en frío	64
3.1.8	Acabado	65
3.2	Antecedentes históricos y situación actual de la industria siderúrgica en México	65
3.3	Perspectivas de la producción y consumo de energía en México	67

3.4	Consumo específico de energía y emisiones de carbono de la industria siderúrgica en México	75
3.4.1	Análisis de descomposición	75
3.4.2	Análisis de estructura - eficiencia	76
3.4.3	Emisiones de carbono	78
3.5	Comparaciones internacionales	79
3.6	Potencial de mejoramiento de eficiencia energética y medidas propuestas	83
3.7	Conclusiones	85
<b>Capítulo 4</b>	<b>Industria del cemento</b>	<b>87</b>
4.1	Descripción del proceso de fabricación	88
4.1.1	Preparación de la materia prima	88
4.1.2	Fabricación del clínker	90
4.1.3	Molienda del cemento	96
4.1.4	Equipo anticontaminante	97
4.2	Antecedentes históricos y situación actual de la industria del cemento en México	98
4.3	Perspectivas de la producción y consumo de energía en la industria del cemento en México	100
4.3.1	Mejoras tecnológicas	103
4.3.2	Sustitución parcial del clínker por materiales con propiedades cementantes	103
4.3.3	Sustitución parcial de los combustibles fósiles por residuos industriales	105
4.4	Consumo específico de energía y emisiones específicas de bióxido de carbono de la industria del cemento en México	106
4.4.1	Análisis de descomposición	107
4.4.2	Análisis de estructura-eficiencia	108
4.4.5	Emisiones de carbono	109
4.5	Comparaciones internacionales	111
4.6	Potencial de mejoramiento de eficiencia energética y medidas propuestas	119
4.7	Conclusiones	123
	<b>Conclusiones</b>	<b>125</b>
	<b>Anexo I. Glosario de términos</b>	<b>131</b>
	<b>Anexo II. Abreviaturas</b>	<b>135</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>137</b>

# Introducción

## Antecedentes

En los últimos años se discute que la temperatura se ha incrementado ligeramente y que el patrón de precipitaciones ha cambiado en diversas partes del mundo, lo que propicia intensas sequías o inundaciones. Estos problemas pueden generar importantes riesgos a la salud del ser humano, a la vitalidad de los bosques y áreas naturales, así como a la productividad de zonas agrícolas; afectando principalmente a países con escasos recursos económicos. Estos son los riesgos del cambio climático global que se deben principalmente al incremento de las concentraciones de diversos gases en la atmósfera - como el bióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el metano - que incrementan el efecto invernadero.<sup>3</sup>

El bióxido de carbono es emitido a la atmósfera principalmente al quemar combustibles fósiles en la realización de diversas actividades humanas como son la producción de vapor para procesos industriales, la combustión en automóviles, la generación de electricidad, el calentamiento de agua y la cocción de alimentos en los hogares, etc.

Una parte de este bióxido de carbono es capturado de manera natural por los bosques durante el crecimiento de la biomasa. Sin embargo, el rápido crecimiento industrial y de las zonas urbanas así como la deforestación han ocasionado que la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera aumente.<sup>4</sup>

Ante las graves consecuencias que pueden surgir debido al aumento global de la temperatura se ha manifestado una genuina necesidad de reducir la emisión de los gases de efecto invernadero en diversos sectores y los impactos adversos del cambio climático. Para ello, se han realizado varias convenciones mundiales (Río de Janeiro, Kyoto) donde diversos países se comprometieron a estabilizar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un nivel en el cual no exista el riesgo de dañar el sistema climático mundial.

Como se mencionó anteriormente, la actividad humana es un factor importante en la emisión de estos gases. En general y en un futuro cercano, una de las opciones más importantes y

---

<sup>3</sup> La Tierra absorbe cierta cantidad de radiación solar y otra cantidad es retransmitida a la atmósfera. Sin embargo, la radiación solar e infrarroja retransmitida por la Tierra es absorbida y reflejada por las moléculas de bióxido de carbono, vapor de agua, metano y óxidos de nitrógeno; la cuál es emitida nuevamente hacia la Tierra en todas direcciones; colaborando con el calentamiento del planeta.

<sup>4</sup> Backlund, P., et. al., 1997, *Climate change, State of the Knowledge*, documento de la oficina de política científica y tecnológica de los Estados Unidos (OSTP), octubre, Washington, E.U.A., p. 1-16.

---

efectivas en la mitigación de los GEI es el mejoramiento de la eficiencia energética. Además, al reducir la cantidad de energía empleada por unidad de actividad se satisfacen ciertas necesidades humanas con el menor consumo posible, y con ello se intenta contribuir a que las generaciones futuras puedan satisfacer adecuadamente sus necesidades.

Otra medida importante en la reducción del consumo de energía es el uso eficiente de los materiales a través del reciclaje y diseño de productos que requieran una menor cantidad de energía en su fabricación.

Para establecer y evaluar cuáles serían las mejores políticas, tanto nacionales como internacionales, en el mejoramiento de la eficiencia energética es fundamental tener la información más adecuada de la demanda y el uso de la energía, así como de la tecnología empleada y su eficiencia. Esta información permite comparar el potencial de eficiencia energética de los diferentes sectores y así evaluar cuáles sectores o cuáles medidas tienen el mayor potencial de ahorro de energía y mitigación de gases de efecto invernadero a un menor costo.

Dentro del marco de la preocupación mundial de la mitigación de gases de efecto invernadero mediante el mejoramiento de la eficiencia energética, la comparación de los indicadores de eficiencia en el tiempo y entre países representa un aspecto importante para la recomendación de ciertas medidas y su evaluación.

Uno de los sectores de demanda de energía más importante en nuestro país es el sector industrial.<sup>5</sup> Desde el punto de vista económico, este sector es una importante fuente de trabajo y aporta una gran variedad de productos y servicios que satisfacen diversas necesidades alimenticias, de infraestructura, etc.<sup>6</sup> Desde el punto de vista energético y ambiental, es un gran consumidor de energía que genera grandes cantidades de bióxido de carbono debido al uso de combustibles fósiles.<sup>7</sup>

El periodo de estudio de este trabajo comprende de 1970 a 1995. En este periodo, la producción industrial creció aceleradamente con una tasa del 4.2% anual; sin embargo, se observó que diversos cambios estructurales, tecnológicos y de sustitución de combustibles influyeron en la eficiencia energética y en las emisiones de GEI del sector.

Para evaluar el mejoramiento de la eficiencia energética en el sector industrial, este trabajo utiliza el consumo específico de energía (CEE) como indicador de eficiencia energética para las industrias más intensivas en el uso de la energía, el cuál se define como la cantidad de energía

---

<sup>5</sup> El sector industrial mexicano está constituido por la industria manufacturera, la construcción y la minería, de acuerdo al Balance Nacional de Energía.

<sup>6</sup> En 1995 contribuyó con el 23.9% del valor agregado nacional.

<sup>7</sup> En 1995 empleó 1833.6 PJ de energía primaria, lo que representó aproximadamente el 35% del consumo final nacional. Además este sector generó 30 millones de toneladas de carbono.

empleada por unidad de producción en términos físicos.<sup>8</sup> Sin embargo, para analizar el sector industrial agregado se usa la intensidad energética, que es la cantidad de energía empleada por unidad de producción en términos económicos. Es importante mencionar que se emplea el consumo de energía primaria, el cuál considera la eficiencia de los procesos de transformación a partir de las fuentes primarias.

## Objetivo

El principal objetivo de esta tesis es proporcionar un sistema de información adecuado acerca de la demanda y el uso de la energía del sector industrial mexicano; a través del análisis de los factores que influyeron en el consumo final de energía primaria, en el consumo específico de energía primaria ( $CEE_p$ ), en las emisiones de carbono y en sus emisiones específicas entre 1970 y 1995. Primero se analiza el sector industrial de manera agregada y posteriormente con mayor profundidad dos de las industrias más intensivas en el uso de la energía y muy importantes en el desarrollo del país: la industria siderúrgica y la industria del cemento.

Otro objetivo es estimar el potencial técnico de mejoramiento de eficiencia energética para México de las industrias siderúrgica y cementera, con el fin de recomendar medidas específicas de ahorro de energía. Este potencial se obtendrá comparando el  $CEE_p$  de las industrias analizadas con el  $CEE_p$  de "la mejor práctica"<sup>9</sup> en el periodo de estudio y además entre diversos países, mostrando los cambios estructurales o los cambios tecnológicos que han adoptado estos países, incluyendo México, para reducir el  $CEE_p$  de estas industrias.

## Metodología

Para poder realizar una comparación en el tiempo y entre países es necesario que los indicadores a través de los cuáles se evalúe la eficiencia energética sean uniformes y tomen en cuenta los cambios estructurales en el tiempo y de cada país. Con el fin de proponer una metodología aceptada por varios países para la comparación de estos indicadores, el Programa de Análisis de Energía del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) junto con el departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad de Utrecht desarrollaron una metodología de comparaciones internacionales para el sector industrial.

Siguiendo las recomendaciones de esta metodología, el consumo de energía primaria del sector industrial se analiza desagregándolo en actividad, estructura e intensidad energética,

---

<sup>8</sup> De acuerdo a las recomendaciones de la metodología de Comparaciones Internacionales. Philipsen, G.J.M., et. al., 1998, *Handbook on International Comparison of Energy Efficiency in the Manufacturing Industry*, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad, Universidad de Utrecht, Holanda.

---

mientras que en el estudio de las emisiones de carbono se examinaron además de las variables mencionadas, los factores de emisión de los combustibles empleados y la mezcla de éstos en este sector y en la generación de electricidad.

En este trabajo se utiliza la metodología del análisis de descomposición<sup>10</sup> tanto para el sector industrial agregado como para las industrias mencionadas; mientras que la del análisis de estructura-eficiencia recomendada por la metodología de Comparaciones Internacionales, se empleó exclusivamente para la industria siderúrgica y la del cemento.

Es importante mencionar que dentro de los factores mencionados se toma en cuenta el uso eficiente de los materiales como medida de reducción del consumo de energía así como a la preservación de recursos naturales como son el mineral de hierro, la caliza y la arcilla; a través del reciclaje de la chatarra en la industria siderúrgica y de la sustitución de materias primas por aditivos o residuos industriales en la industria del cemento.

La ventaja de la metodología de Comparaciones Internacionales es que analiza principalmente las industrias más intensivas en el uso de la energía proponiendo los factores que influyen en mayor medida sobre el consumo de energía para cada industria y emplea indicadores físicos, ya que éstos proporcionan una visión más clara de las diferencias técnicas entre los distintos sectores y los diversos países. Además, permite comparar el potencial de mejoramiento de eficiencia energética entre varios países de acuerdo a sus propias estructuras de producción. La evaluación del CEE<sub>p</sub> en el tiempo y entre países permite apreciar la eficacia de las medidas de ahorro de energía y de las políticas industriales y energéticas de manera objetiva, lo cuál es importante para la política tanto nacional como internacional respecto al Cambio Climático, por ejemplo, en los acuerdos y compromisos así como en la cooperación internacional de transferencia de tecnología o implementación conjunta.

## **Contenido**

En el primer capítulo se definen cada uno de estos factores para el sector industrial y para las ramas industriales mencionadas; se especifican las consideraciones importantes que se toman en cuenta al utilizar indicadores económicos para el análisis agregado de este sector y la definición de los sistemas energéticos de las ramas industriales estudiadas para calcular adecuadamente los indicadores físicos correspondientes. Asimismo se describe la metodología del análisis descomposición para el consumo de energía, para la intensidad energética, para las emisiones de carbono y para las emisiones específicas; y se explica la metodología de Comparaciones

---

<sup>9</sup> El CEE<sub>p</sub> de la mejor práctica se define como el consumo de energía que se emplearía si se utilizara la mejor tecnología disponible y en uso; la cuál considera la composición de la producción de la industria analizada en cada año y para cada país.

<sup>10</sup> También conocida como metodología de índices de cambio.

---

Internacionales para el análisis de estructura-eficiencia que se emplea para la industria siderúrgica y la del cemento.

En el segundo capítulo se analiza, de manera general, la evolución del consumo energético y las emisiones de carbono del sector industrial mexicano de 1970 a 1995, en el cuál se emplean indicadores económicos para los diferentes factores debido a que para su estudio se tienen que tomar en cuenta una gran variedad de productos. Para los indicadores económicos de este sector es importante definir el sistema energético y su correspondencia con el valor agregado, por lo que se explica la definición del consumo final de cada rama industrial de acuerdo al Balance Nacional de Energía (BNE) y el valor agregado de las mismas de acuerdo al Sistema de Cuentas Nacionales (SCN). Finalmente se realizó un análisis de las tendencias en el consumo energético y en las emisiones de carbono utilizando la metodología del análisis de descomposición.

En el tercer y cuarto capítulo se estudian el consumo de energía de la industria siderúrgica y de la del cemento respectivamente, enfatizando en la reducción de sus consumos específicos de energía primaria y de sus emisiones específicas de carbono. Para ello, se analizan las tendencias en la producción y en el consumo de energía durante el periodo estudiado y se explican mediante la metodología del análisis de descomposición y de estructura-eficiencia los factores que contribuyeron a dichas disminuciones. Además se estima el potencial técnico de eficiencia energética para estas industrias, y se comparan tanto su eficiencia energética como sus potenciales de ahorro de energía con otros países. Finalmente se recomiendan algunas medidas para mejorar la eficiencia energética de estas industrias.

## **Capítulo 1.**

# **Metodologías de índices de cambio y Comparaciones Internacionales de Eficiencia Energética en la Industria Manufacturera**

El contenido de este capítulo se divide en cuatro partes. En la primera se explica la metodología del análisis de descomposición del consumo de energía y emisiones de bióxido de carbono la cuál se utilizó para analizar el sector industrial de manera agregada. Esta metodología permite conocer cómo ha sido la evolución del consumo de energía y de la intensidad energética debido a factores estructurales o de eficiencia energética. En la segunda parte se describe de manera general la metodología de Comparaciones Internacionales: los objetivos de esta metodología; los niveles de agregación empleados de acuerdo a la disponibilidad de datos para definir los indicadores de actividad, de estructura y de eficiencia energética; la estimación del potencial técnico de ahorro de energía a partir de la reducción del consumo específico de energía (CEE) real a uno óptimo; la representación gráfica de los indicadores de eficiencia energética en función de los factores estructurales para analizar las variaciones en la eficiencia debido a cambios tecnológicos o estructurales a lo largo del tiempo y entre países.

En la tercera y cuarta parte se describen respectivamente las metodologías de análisis empleadas para la industria siderúrgica y para la industria del cemento. Para ambas industrias se explican brevemente sus procesos de fabricación para especificar las fronteras de los sistemas energéticos considerados por el Balance Nacional de Energía (BNE).

El análisis de las tendencias del consumo de energía y de las emisiones asociadas de bióxido de carbono permite entender cuáles son los factores que provocaron el cambio en las tendencias, y permite sugerir políticas energéticas que promuevan la disminución tanto del consumo de energía, como de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este análisis se puede llevar a cabo a través de las metodologías de índices de cambio y comparaciones internacionales.

Existen diversas metodologías de índices de cambio que permiten valorar el peso que los factores estructurales o de eficiencia energética han tenido en el consumo de energía. La aplicación de estas metodologías y de sus variables explicativas depende tanto de los objetivos del análisis como de la información disponible. Para el caso del sector industrial, una de las metodologías más utilizada es la de intensidades energéticas basadas en indicadores económicos (energía por unidad de valor agregado). Sin embargo, en este caso, y particularmente cuando la información está poco desagregada, es difícil separar con claridad el peso relativo de los factores estructurales y de eficiencia. Por ello, el grupo de Estudios Internacionales del LNBL desarrolló una metodología para las ramas industriales intensivas en el uso de la energía basada en variables físicas (producción), que uniformiza los indicadores de eficiencia energética separándolos de los factores estructurales, lo cual permite comparar tanto las eficiencias como los potenciales de ahorro de energía en el tiempo y entre países.

Asimismo, este análisis permite determinar qué industrias tienen el mayor potencial de eficiencia energética y de reducción de emisiones de carbono a un menor costo, lo que ayuda a elaborar políticas nacionales e internacionales y darles seguimiento.

## 1.1 Metodología del análisis de descomposición

En este inciso se describe la metodología del análisis de descomposición que se empleará en capítulos posteriores para analizar el consumo de energía del sector industrial, de la industria siderúrgica y de la industria del cemento.

Para comprender las variables que influyen en la demanda de energía de un país, sector o subrama, Schipper y Meyer proponen la metodología del análisis de descomposición en la cuál sugieren que el consumo de energía está determinado principalmente por 3 factores:

- Su nivel de actividad (en valor agregado, toneladas producidas, pasajeros transportados, etc. de acuerdo al sector que se analice)
- La mezcla de las actividades realizadas o de los productos manufacturados (estructura)
- La cantidad de energía utilizada para realizar una actividad específica (intensidad energética)

La metodología de análisis de descomposición explica los cambios del consumo de energía considerando que sólo uno de los factores varía, mientras que los otros se mantienen constantes. Esta metodología ha sido utilizada ampliamente para explicar la contribución de los cambios económicos y de los cambios de la intensidad energética en el consumo de energía de un sector.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Ang, B.W., 1995, "Decomposition Methodology in industrial energy demand analysis" en *Energy*, vol. 20, no. 11, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 1081-1095.

Es importante mencionar que esta metodología se emplea principalmente para el análisis del consumo energético en un nivel de país o de sectores en unidades económicas, aunque también se han realizado estudios que emplean unidades físicas.

Para el sector industrial, en términos económicos y en un nivel de agregación sectorial o de rama industrial, estos indicadores se definen de la siguiente manera:

El nivel de actividad (P) se determina a través del nivel de producción con el valor agregado, valor de la producción o producción bruta.

$$P_T = \sum P_{it} \quad (1.1)$$

donde  $P_T$  se refiere al valor agregado total nacional o del sector industrial, y  $P_{it}$  es el valor agregado del sector  $i$  o de la rama industrial  $i$  en el año  $t$ .

La estructura (S) se especifica a través de la composición de actividades o de productos finales, y se define como la participación del valor agregado de cada sector en el valor agregado nacional o de cada rama industrial en el sector industrial.

$$S_{it} = \frac{P_{it}}{P_T} \quad (1.2)$$

donde  $S_{it}$  es la estructura del sector  $i$  o de la rama industrial  $i$  en el año  $t$ .

La intensidad energética (I) es utilizada como el indicador de eficiencia energética y se define como la cantidad de energía necesaria por unidad de valor agregado en el sector industrial.

$$I_{it} = \frac{E_{it}}{P_{it}} \quad (1.3)$$

donde  $I_{it}$  es la intensidad energética del sector o rama industrial y  $E_{it}$  es el consumo energético del sector  $i$  o de la rama  $i$  en el año  $t$ .

En este indicador, la definición del numerador depende del objetivo del análisis así como de la disponibilidad de los datos. Así, el consumo de energía puede estar definido como: energía útil, energía por usos finales, energía final, energía neta disponible, energía comprada o demanda de energía primaria, los cuáles se describen en el inciso 2.1.

Finalmente, el consumo de energía total del sector industrial o de una rama industrial se basa en la siguiente relación:

$$E_t = P_T \sum S_{it} I_{it} \quad (1.4)$$

El cambio en el consumo de energía de este sector entre un año inicial 0 y un año final T puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\Delta E = E_T - E_0 \quad (1.5)$$

Como se mencionó anteriormente el consumo de energía es una función de tres variables, al aplicar la fórmula de diferencial total, el cambio del consumo de energía entre un año inicial 0 y un año final T se puede descomponer en cuatro términos, que explican la manera en que ha variado el consumo de energía suponiendo únicamente cambios en el nivel de actividad, en la estructura o en la intensidad energética:

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_p + \Delta E_s + \Delta E_i + \text{residuales} \quad (1.6)$$

El primer término denota la estimación del efecto del nivel de producción, el segundo término estima el efecto de la estructura, el tercer término estima el efecto de la intensidad energética y el cuarto término denota el efecto de los residuales, es decir, el efecto conjunto de dos o más variables.

El efecto del nivel de producción significa el cambio en el consumo de energía debido a la producción, bajo la suposición de que la estructura y la intensidad energética se mantuvieron constantes, a lo que en economía se conoce como *ceteris paribus*. El efecto de la estructura y de la intensidad energética estima los efectos de estas variables en el consumo de energía del sector, considerando *ceteris paribus*. Los efectos residuales aparecen debido a los efectos combinados de las diferentes variables.

Existen varios métodos de descomposición para calcular la manera en que estos efectos influyen en los cambios del consumo de energía. Es importante mencionar que los resultados son dependientes del método empleado. Los principales criterios de selección del método son: aquél con el cuál se obtenga el menor residuo y aquél que tenga una mayor facilidad para realizar los cálculos de acuerdo con los datos disponibles.<sup>12</sup>

De acuerdo con Ang,<sup>13</sup> las fórmulas generales para calcular los efectos que influyen en el consumo de energía empleando la técnica aditiva para el método paramétrico 2 de Divisia (PDM2) son:

$$\Delta E_{P_{t,0}} = (P_t - P_0) \sum_i [S_{i0} I_{i0} + \alpha (S_{it} I_{it} - S_{i0} I_{i0})] \quad (1.7)$$

$$\Delta E_{S_{t,0}} = \sum_i (S_{it} - S_{i0}) \cdot [I_{i0} P_0 + \beta (I_{it} P_t - I_{i0} P_0)] \quad (1.8)$$

<sup>12</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091.

$$\Delta E_{i,t,0} = \sum_i (I_{it} - I_{i0}) \cdot [P_0 S_{i0} + \tau (P_t S_{it} - P_0 S_{i0})] \quad (1.9)$$

Los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\tau$  pueden tomar valores entre 0 y 1, sus valores se eligen de acuerdo al objetivo del análisis. Un valor de 0 para todos los parámetros mide los efectos respecto al año inicial  $t_0$ ; un valor de 0.5 le da el mismo peso a ambos años y los efectos se miden de manera simétrica respecto al tiempo. Estos resultados pueden ser empleados para conocer las tendencias históricas del consumo de energía. Finalmente, valores entre 0.5 y 1 para todos los parámetros adjudican un mayor peso al año final  $t$  y los resultados obtenidos pueden reflejar tendencias futuras en el consumo de energía y ser utilizados para realizar pronósticos.

Con los datos disponibles y conforme a la clasificación de Ang, se eligieron los índices del promedio simple (AVE-PDM2) para analizar el consumo de energía y la intensidad energética del sector industrial mexicano; el consumo energético y el consumo específico de energía de la industria siderúrgica y de la industria del cemento. La aproximación del promedio simple (AVE-PDM2) evalúa los efectos de manera simétrica del periodo estudiado donde el valor de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\tau$  es igual a 0.5.

Si el consumo de energía del sector industrial se analiza en periodos largos o si la producción crece de manera acelerada, el efecto debido a la producción será mucho mayor a los efectos estructurales y de intensidad energética. En estos casos se recomienda utilizar la aproximación del análisis de la intensidad energética, la cuál considera únicamente los cambios estructurales en la producción y los cambios en la intensidad energética de cada rama industrial. Las fórmulas son análogas a las utilizadas en la aproximación del análisis del consumo energético.<sup>14</sup>

$$\Delta I = \Delta I_S + \Delta I_I + \text{residuales} \quad (1.10)$$

$$\Delta I_{S,t,0} = \sum_i (S_{it} - S_{i0}) \cdot [I_{i0} + \beta (I_{it} - I_{i0})] \quad (1.11)$$

$$\Delta I_{I,t,0} = \sum_i (I_{it} - I_{i0}) \cdot [S_{i0} + \tau (S_{it} - S_{i0})] \quad (1.12)$$

Dependiendo de la disponibilidad de datos, los cambios en el consumo de energía o en la intensidad energética se pueden analizar en un periodo o a través de una serie de tiempo. El análisis de un periodo es más sencillo porque se requieren menos datos y da una idea de las

<sup>14</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1088.

causas de estos cambios. Sin embargo, se prefiere un análisis de serie de tiempo, ya que permite observar la evolución de los efectos de las variables en el tiempo, el efecto residual es menor y los resultados de este análisis son menos dependientes del método empleado. Este tipo de análisis estima el cambio en el consumo de energía o en la intensidad energética año con año rotando el año base, y el efecto entre el año final y el inicial se calcula como la suma de los cambios de cada año:<sup>15</sup>

$$\Delta E_{i,T} = \sum_{t=1}^{T-1} E_{A_{i,t+1}} + \sum_{t=1}^{T-1} E_{S_{i,t+1}} + \sum_{t=1}^{T-1} E_{I_{i,t+1}} + \sum_{t=1}^{T-1} \text{residuales}_{i,t+1} \quad (1.13)$$

$$\Delta I_{i,T} = \sum_{t=1}^{T-1} I_{S_{i,t+1}} + \sum_{t=1}^{T-1} I_{I_{i,t+1}} + \sum_{t=1}^{T-1} \text{residuales}_{i,t+1} \quad (1.14)$$

De acuerdo con Ang, uno de los principales problemas de realizar estudios en un nivel muy agregado es que no se puede estimar el impacto total del efecto estructural en el consumo de energía del sector industrial; ya que al desagregar el impacto de este efecto en las ramas industriales se observa que cada una de ellas sigue un patrón diferente entre ellas, e incluso respecto al del sector industrial nacional. La mejor aproximación para poder estimar el impacto total del efecto estructural se obtiene en niveles de agregación muy bajos, es decir, en un nivel de planta industrial o de producto. Lo mismo sucede para poder estimar el efecto de la intensidad energética y medir los cambios en la eficiencia de los procesos industriales.

Observando esto, la metodología de Comparaciones Internacionales se desarrolló principalmente para las industrias más intensivas, y emplea indicadores físicos, ya que éstos proporcionan una visión más clara de las diferencias técnicas entre los distintos sectores y los diversos países; además permite comparar el potencial de mejoramiento de eficiencia energética entre varios países de acuerdo a sus propias estructuras de producción.

### 1.1.1 Consideraciones importantes para los indicadores económicos

El empleo de los indicadores económicos de actividad y de eficiencia energética son ampliamente utilizados para analizar el consumo energético del sector industrial debido a la gran disponibilidad de datos en niveles de agregación nacional, sectorial o de rama industrial. En un nivel nacional se utiliza el Producto Interno Bruto (PIB); y en un nivel sectorial o de rama industrial se utiliza el valor agregado. Esto representa una gran ventaja cuando en un nivel nacional o

<sup>14</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091

<sup>15</sup> Farla, J., et al., 1995, "Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using physical production data", en *Energy policy*, vol. 25, no. 7-9, p.746

sectorial se tienen varios tipos de actividades humanas; o cuando algunas ramas industriales fabrican una gran diversidad de productos, los cuáles de alguna manera son uniformizados al considerar su valor económico y convertirlo en unidades monetarias.

Un indicador económico de actividad ampliamente utilizado es el valor agregado. Sin embargo, existen algunas desventajas que impiden comparar niveles de eficiencia energética de un país en el tiempo o respecto a otros países. Una de ellas es que el valor agregado depende en gran medida de los precios de las materias primas, de los productos, etc. Como se observa, estos indicadores contienen factores estructurales que no son tan fácilmente separados de los de eficiencia energética.

Para comparar estos indicadores respecto a otros países hay que convertir la moneda nacional de un país a un tipo de moneda de referencia. La moneda de referencia comúnmente empleada es el dólar de Estados Unidos de Norteamérica. Esta conversión puede realizarse a través del tipo de cambio o del poder de paridad de compra (ppc).<sup>16</sup> Con la primera metodología, sólo se cambia la moneda nacional a una moneda de referencia al aplicar un promedio anual del tipo de cambio en el mercado. Mientras que con el poder de paridad de compra se intenta emparejar el poder de compra de las distintas monedas a través de un factor, es decir, el factor ppc se define como la cantidad de unidades monetarias de un país que se requiere para comprar cierta cantidad de bienes o servicios en su mercado doméstico respecto a lo que se podría comprar con un dólar en el mercado estadounidense.<sup>17</sup>

Se prefiere utilizar el ppc respecto al tipo de cambio ya que al emplear el ppc para convertir el PIB o el valor agregado se intenta expresar estos montos bajo un mismo conjunto de precios internacionales, de tal manera que al compararlos entre países refleje únicamente las diferencias en los niveles de producción.

Por otra parte, es importante tomar en cuenta la devaluación de cada moneda, así como las variaciones en los precios, las cuáles son diferentes para cada país e inclusive para cada rama industrial. Para ello, la moneda corriente se convierte a una moneda constante referidas a un año base a través de factores denominados deflatores del PIB. Estos factores consideran las variaciones en los precios de un conjunto determinado de bienes y servicios para cada rama industrial o sector.

Se recomienda que los indicadores económicos primero sean expresados en moneda constante referida a un año base para eliminar la inflación y posteriormente convertirlos a la moneda de referencia a través del ppc.<sup>18</sup>

---

<sup>16</sup> En inglés, el poder de paridad de compra se le conoce como *purchasing power parity* (ppp).

<sup>17</sup> Phylipsen, et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 13

<sup>18</sup> Phylipsen, et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 14

Es importante mencionar que no existe una relación directa uno a uno de los indicadores físicos a los económicos, ya que un aumento en el valor agregado pudo deberse a un incremento en alguna variable como los precios, aunque la cantidad producida haya disminuido. Worrell y sus colegas realizaron una comparación de los indicadores físicos y económicos para la industria siderúrgica de siete países: Brasil, Japón, Alemania, China, Francia, Polonia y Estados Unidos. Encontraron que las variaciones en las intensidades energéticas calculadas a partir del valor agregado para esta rama industrial en los países industrializados se comportan de manera similar a los cambios del CEE, que es un indicador físico y se calcula utilizando la producción en toneladas de acero crudo. Sin embargo, estos indicadores no siguieron la misma tendencia en los países en desarrollo; en el caso de China y Polonia, la falta de correlación entre los indicadores físicos y económicos se debe principalmente a que el establecimiento de los precios no es tan dependiente de los precios en el mercado, ni de los costos de las materias primas.<sup>19</sup>

### 1.1.2 Cálculo de las emisiones de bióxido de carbono para el sector industrial

Para el cálculo de las emisiones de bióxido de carbono (expresados en toneladas de carbono) se emplearon los factores de emisión propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) de acuerdo a los combustibles utilizados que se presentan en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1 Factores de emisión de carbono para combustibles fósiles y biomasa sólida**

Combustible	Factor de emisión de carbono FEC [ton C/TJ] <sup>20</sup>
Diesel	20.2
Combustóleo	21.1
Gas licuado a presión	17.2
Lubricantes	20.0
Coque	25.8
Carbón bituminoso	25.8
Carbón subbituminoso	26.2
Gas natural	15.3
Biomasa sólida	29.9

Fuente: IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, p. 1.6

Las emisiones de carbono de estos combustibles se calculan como:

$$E_m = \sum_{ij} E_{ij} F E C_{ij} \quad (1.15)$$

<sup>19</sup> Worrell, E., L. Price, Nathan Martin, Jacco Farla and Roberto Schaeffer, 1997, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 734-742.

<sup>20</sup> En este trabajo, las emisiones de bióxido de carbono se expresan en unidades de carbono, para convertirlos a unidades de bióxido de carbono es necesario multiplicar por el factor 3.67

donde  $i$  se refiere a las diferentes ramas industriales

$j$  a los diferentes combustibles

$E$  al consumo de energía en [PJ]

FEC es el factor de emisión de carbono de cada combustible en [ton de C/PJ]

El factor de emisión de carbono (FEC) de cada combustible se define como la cantidad de carbono generado al emplear una unidad de energía de dicho combustible. Este FEC para los combustibles fósiles y para la biomasa es fijo, es decir, no varía en el tiempo. Sin embargo, el FEC de la electricidad se modifica de acuerdo al consumo de energía primaria utilizado (combustibles fósiles y de energías renovables) para generar electricidad en un determinado año, y se calcula de la siguiente manera:

$$FEC_{elect,t} = \sum_i \left( \frac{C_{i,t}}{PE_t} \right) \cdot FEC_{i,t} \quad (1.16)$$

donde  $i$  se refiere al combustible utilizado

$C_i$  se refiere al consumo total del combustible  $i$  empleado para generar electricidad en las plantas generadoras del país en el año  $t$  en [PJ]

$FEC_i$  es el factor de emisión de carbono del combustible  $i$  en [ton de C/PJ]

$PE$  se refiere a la producción neta de electricidad de todas las plantas generadoras del país en el año  $t$  en [PJ], tomando en cuenta las pérdidas de transmisión y distribución

De esta forma se calcularon los factores de emisión de carbono para la generación de electricidad para México de 1970 a 1995, los cuáles se presentan en la tabla 1.2.

De manera similar al análisis de descomposición empleado para explicar los cambios en el consumo de energía, los cambios en las emisiones de carbono debidas al uso de la energía en el sector industrial se explican a través de los siguientes factores: nivel de actividad, de estructura, de intensidad energética y de los factores de emisión de carbono que incluye tanto la participación de los diferentes combustibles en el consumo final total de energía del sector o de cada rama industrial como en la generación de electricidad.

Las emisiones de carbono debidas al uso de la energía en el sector industrial se calculan de la siguiente manera:

$$Em_t = \sum_{i,j} P_{T,j} \cdot S_{i,j} \cdot I_{i,j,t} \cdot \left[ FEC_{i,j,t} \cdot \left( \frac{E_{i,j,t}}{E_{j,t}} \right) \right] \quad (1.17)$$

donde  $j$  se refiere a los combustibles utilizados en el sector industrial

$i$  se refiere a cada rama industrial

Em se refiere a las emisiones de carbono para el año  $t$

P se refiere a la producción de cada sector industrial

FEC \*  $(E_j/E_i)$  se refiere al factor de emisión para el combustible  $j$  de la rama industrial  $i$  considerando la participación del combustible  $j$  en la energía total de la rama  $i$

El cambio en las emisiones de carbono del sector industrial debidas a efectos en el nivel de producción, en la estructura, en la intensidad energética y en los factores de emisión se calcula como:

$$\Delta Em = \Delta Em_A + \Delta Em_s + \Delta Em_i + \Delta Em_{FEC (E_j/E_i)} + \text{residuales} \quad (1. 18)$$

**Tabla 1.2 Factores de emisión de carbono para la electricidad de 1970 a 1995**

Año	Factor de emisión [ton de C/TJ]
1970	35.5
1971	40.6
1972	41.7
1973	42.7
1974	44.3
1975	50.3
1976	48.3
1977	46.4
1978	51.2
1979	49.4
1980	53.1
1981	46.6
1982	48.6
1983	51.3
1984	51.0
1985	49.6
1986	53.2
1987	54.8
1988	53.8
1989	52.7
1990	51.5
1991	51.8
1992	49.4
1993	49.5
1994	54.6
1995	49.0

Fuente: IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, p. 1.6; SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F., p. 73.

Sin embargo, de manera similar a lo que sucede en el análisis del consumo de energía para periodos muy largos o cuando la producción crece de manera acelerada, es mejor utilizar un análisis de las emisiones específicas (intensidad de emisiones de carbono) en lugar de las

emisiones totales para entender como influyen los efectos de la estructura, de la intensidad energética y de los factores de emisión (ecuaciones 1.19 y 1.20).

$$\left( \frac{Em}{P} \right)_t = \sum_{i,j} S_{i,t} \cdot I_{i,j,t} \cdot \left[ FEC_{i,j,t} \cdot \left( \frac{E_{i,j,t}}{E_{i,t}} \right) \right] \quad (1.19)$$

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right) = \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_s + \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_i + \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_{FEC \cdot E_i / E_T} + \text{residuales} \quad (1.20)$$

donde cada uno de los efectos se calcula como:

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_s = \sum_{i,j} (S_{i,t} - S_{i,0}) \left[ I_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) + \beta \left( I_{i,t} \cdot \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - I_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \right] \quad (1.21)$$

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_i = \sum_{i,j} (I_{i,t} - I_{i,0}) \left[ S_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) + \tau \left( S_{i,t} \cdot \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - S_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \right] \quad (1.22)$$

Es importante mencionar que el efecto de las variaciones en los factores de emisión y la mezcla de combustibles, suponiendo que los demás factores que influyen en estas emisiones se conservan constantes, refleja principalmente el efecto de la manera en que se produjo la electricidad empleada en este sector y la sustitución de combustibles en cada rama industrial.

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_{FEC \cdot E_i / E_T} = \sum_{i,j} \left( \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \left[ S_{i,0} \cdot I_{i,0} + \gamma (S_{i,t} \cdot I_{i,t} - S_{i,0} \cdot I_{i,0}) \right] \quad (1.23)$$

De manera similar al análisis del consumo de energía y de intensidad energética descritas anteriormente, las consideraciones de los parámetros  $\beta$ ,  $\tau$  y  $\gamma$  dependen de la disponibilidad de datos y del método seleccionado para el análisis. Además, si se cuenta con datos para una serie de tiempo, se pueden medir los cambios en las emisiones específicas de carbono año con año rotando el año base, y conocer el efecto total de los cambios entre el año final y el inicial como en la ecuación 1.14.

$$\Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{t,T} = \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{t,t+1(S)} + \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{t,t+1(I)} + \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{t,t+1(FEC^E/E_T)} + \sum_{t=0}^{T-1} \text{residuales}_{t,t+1} \quad (1.24)$$

## 1.2 Metodología de Comparaciones Internacionales

La metodología de Comparaciones Internacionales tiene como objetivos: analizar la eficiencia energética de las industrias más intensivas en el uso de la energía del país estudiado, calcular el potencial de mejoramiento de eficiencia energética en ese país y comparar sus respectivas eficiencias y potenciales entre países.

El calcular el potencial técnico de eficiencia energética de las industrias en un país permite, en un nivel agregado, conocer cuáles son las industrias con mayor potencial de ahorro; y en un nivel más desagregado, proponer, analizar y monitorear medidas de eficiencia energética en dichas industrias de acuerdo a sus propias características.

Estudios anteriores han realizado comparaciones del sector industrial entre países, sin embargo, se han encontrado que las diferencias de eficiencia energética entre ellas se deben más a diferencias en su estructura económica que a su eficiencia.

La metodología de Comparaciones Internacionales analiza las industrias más intensivas en el uso de la energía y determina uno o varios factores estructurales que influyen sobre cada una de estas industrias así como algunos factores explicativos que aportan información adicional para comprender mejor las diferencias entre los distintos niveles de eficiencia energética, tal como la penetración de nuevas tecnologías.<sup>21</sup>

Esta metodología recomienda que exista claridad en la definición de las fronteras del sistema analizado, en la medición del consumo de energía y en el caso de que se utilicen indicadores económicos que exista uniformidad entre ellos. Es preferible el empleo de indicadores físicos; sin embargo, la gran cantidad y diversidad de productos fabricados en la Industria Manufacturera o la falta de datos desagregados para algunas ramas industriales dificulta la utilización de unidades físicas para su estudio.

Esta metodología no sólo es útil para realizar comparaciones entre países, también puede ser empleada para analizar la evolución de la eficiencia energética en la industria de un país a lo largo del tiempo.

El indicador de eficiencia energética por excelencia es el consumo específico de energía (CEE)<sup>22</sup> que se define como la cantidad de energía (como entalpía) necesaria para realizar una

<sup>21</sup> Phylipsen, G.J.M., et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 14

<sup>22</sup> En inglés se conoce como *Specific Energy Consumption* (SEC)

actividad específica.<sup>23</sup> El CEE de una rama industrial está influenciado principalmente por tres factores: el tipo de productos fabricados, el tipo de procesos empleados (que en buena medida dependen del tipo de materias primas utilizados, como es el caso de la chatarra y el papel reciclado) y la eficiencia energética de los procesos. Siendo la eficiencia energética el factor que puede ser mejorado.<sup>24</sup>

Uno de los objetivos de esta metodología es diferenciar los cambios debidos a factores estructurales, de los de eficiencia energética, así como tomar en cuenta los factores estructurales que son característicos de cada país.

La estructura de una rama industrial se puede definir de dos maneras: como la combinación de actividades o como la combinación de productos. La diferencia en estas definiciones puede ejemplificarse con la industria del cemento. Si la estructura se define como la combinación de actividades, ésta es diferente si el proceso de producción de cemento es seco o es húmedo; mientras que si la estructura se define como la combinación de productos, lo importante es conocer la participación de los productos intermedios o finales en la producción total y la eficiencia en la producción de cada uno de ellos. En la primera definición, un alto consumo de energía se explicaría a través de las diferencias en la estructura del sector, mientras que en la segunda a través de su eficiencia energética.

En la metodología de Comparaciones Internacionales, la estructura de una rama industrial se define de acuerdo a la combinación de los productos. De esta forma, se consideran como factor estructural la participación de determinado producto en la producción total. Por ejemplo, en la industria siderúrgica, un factor estructural puede ser el porcentaje de chatarra que se introduce en el proceso de producción; en la industria de la celulosa y el papel son factores estructurales, la cantidad de material reciclado o de celulosa que se utiliza en la producción de papel. De la misma forma, otro aspecto que puede ser considerado como factor estructural es la exportación o importación de productos intermedios en cierta industria. Por ejemplo, en la fabricación del cemento, la cantidad de clínker importado o exportado en un país es un factor estructural que afecta el consumo energético de la industria cementera.

Finalmente, el potencial técnico de eficiencia energética se obtiene al confrontar el CEE real de cierta rama industrial en un país respecto a un CEE óptimo de acuerdo a la mejor tecnología en uso actualmente. El CEE óptimo es calculado como resultado de la combinación ideal de las opciones tecnológicas más eficientes para la producción de una rama industrial.

---

<sup>23</sup> Worrell, E., 1994, *Potentials for Improved Use of Industrial Energy and Materials*, tesis doctoral, Departamento de Sociedad, Ciencia y Tecnología, Universidad de Utrecht, Holanda, p. 12

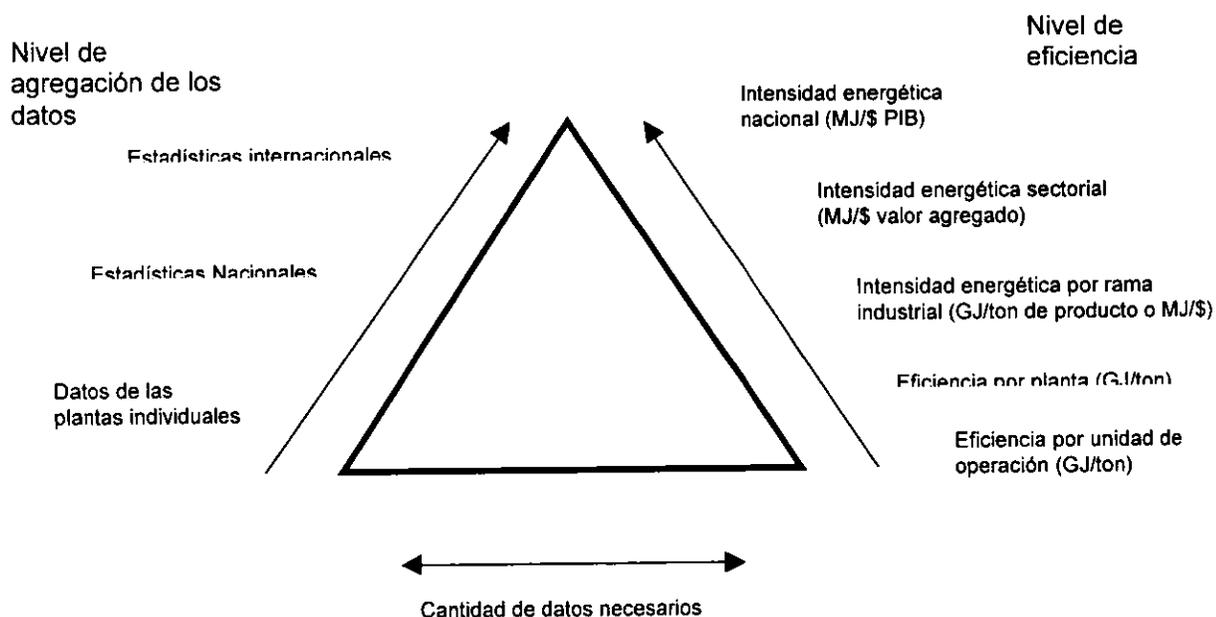
<sup>24</sup> Worrell, E., 1994, *Op. cit.*, p. 11-14

### 1.2.1 Niveles de agregación en la metodología de Comparaciones Internacionales

Los indicadores de actividad, estructura y eficiencia energética se definen de acuerdo al nivel de agregación del estudio.<sup>25</sup>

- Nacional
- Principales sectores de demanda (Industria manufacturera, residencial, transporte, servicios)
- Principales subsectores industriales (industrias metálicas básicas, industrias de alimentos, industria química, etc.)
- Ramas industriales (industria siderúrgica, industria azucarera, industria del cemento, etc.)
- Procesos de una rama industrial o en un nivel de plantas individuales

Mientras más agregado es el nivel de estudio, se tienen más factores estructurales. A medida que el nivel es menos agregado, aumentan los indicadores que permiten entender los factores que determinan el consumo de energía. Esto se representa con mayor claridad a través de la pirámide de indicadores de eficiencia energética:



Fuente: Philipsen, D., et. al., 1998, *Manual de Comparaciones Internacionales de eficiencia energética en el sector industrial*, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad, Universidad de Utrecht, Utrecht, Holanda, p. 19

**Figura 1.1 Pirámide de indicadores de eficiencia**

Para el sector industrial se tienen principalmente dos niveles de agregación, los cuáles se describen a continuación.

<sup>25</sup> Philipsen, D.J., et.al., 1998, *Op. cit.*, p. 19

### 1.2.1.1 Nivel agregado

El nivel agregado se refiere al nivel de una rama industrial. En este nivel se recomienda utilizar el consumo de energía neta disponible que incluya el consumo de todos los procesos involucrados en esa rama industrial. Debido a que una rama industrial generalmente emplea varios procesos en paralelo para la fabricación de un producto, y cada uno de ellos tiene un consumo específico particular, el CEE compuesto para toda la rama se determina a través de la siguiente fórmula:<sup>26</sup>

$$CEE = \sum_{k=1}^{k=n} CEE_k \cdot \frac{P_k}{P} \quad (1.25)$$

donde CEE es el consumo específico de energía de la rama industrial con n procesos (expresado en GJ/ton)

$CEE_k$  es el consumo específico de energía del proceso  $k$  (cada proceso  $k$  debe tener definidos tanto el tipo de materia prima empleada como el tipo de producto manufacturado) en GJ/ton

$P_k$  es el volumen de producción del producto  $k$ , medido en toneladas

$P$  es el volumen total de producción de toda la rama industrial, también medido en toneladas

De esta manera, el CEE considera todos los procesos empleados y la eficiencia energética de cada proceso.

El CEE debe ser especificado de manera separada para combustibles (incluyendo biomasa y materiales de desecho) y para electricidad. Además, es conveniente determinar un CEE agregado que permita conocer la demanda de energía primaria, y considerar a todos los combustibles como un solo suministrador de energía. El consumo específico de energía primaria ( $CEE_p$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$CEE_p = CEE_{c,k} + \frac{CEE_{e,k}}{\eta_e} \quad (1.26)$$

donde  $CEE_p$  es el CEE expresado como la demanda de energía primaria necesaria por tonelada de productos [GJ/ton] asociado a un proceso  $k$

$CEE_{c,p}$  es el CEE del combustible por producto asociado con cierto proceso industrial  $k$  expresado en GJ/ton

$CEE_{e,p}$  es el CEE de electricidad por producto asociado con cierto proceso industrial  $k$  [GJ<sub>e</sub>/ton]

$\eta_e$  es la eficiencia promedio de las plantas generadoras de electricidad del país analizado.<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Worrell, E., 1994, *Op. cit.*, p. 27.

<sup>27</sup> La eficiencia de generación de electricidad se calculó como:

La cogeneración dentro de las industrias se contabiliza en cada rama industrial donde es utilizada, en lugar del sector de transformación.

En el caso de no disponer de los datos del consumo de energía neta disponible, se puede emplear el consumo de energía final y considerar el nivel de penetración de la cogeneración como un factor explicativo.<sup>28</sup>

En este nivel de agregación, el CEE se encuentra afectado por varios efectos estructurales, por lo que es recomendable emplear al menos dos indicadores adicionales: la combinación de productos finales fabricados (como indicador estructural) y el tipo de materias primas utilizados (como indicador estructural o explicativo, de acuerdo al impacto de éstas en la combinación de productos finales).

### 1.2.1.2 El nivel desagregado

El nivel desagregado se refiere a plantas específicas o a unidades de operación de algún proceso. En este nivel se recomienda utilizar el consumo de energía final, ya que en muchos casos es difícil averiguar la cantidad de vapor o de electricidad producto de la cogeneración que es empleada en ciertos procesos o en la fabricación de un producto específico.

El CEE desagregado se determina para un proceso o producto específico, por ejemplo, el CEE para fabricar cemento utilizado en el proceso húmedo, el CEE para producir acero primario, etc.

Este nivel de desagregación permite conocer el nivel de eficiencia energética claramente por lo que no es necesario incluir indicadores explicativos. Sin embargo, es recomendable incluir algún indicador que muestre el nivel de penetración de la tecnología, para determinar el estado tecnológico en el que se encuentra dicha planta.

## 1.2.2 Nivel de eficiencia energética

En el marco de esta tesis el mejoramiento de la eficiencia energética de un proceso industrial significa reducir el CEE de un proceso o de la rama industrial analizada lo cuál implica evaluar el efecto total de todas las medidas de mejoramiento de eficiencia energética implantadas en ese proceso o rama industrial.

En esta tesis, con base en la metodología de Comparaciones Internacionales, el potencial técnico de eficiencia energética se calcula comparando el CEE actual de una industria, tomando en cuenta sus factores estructurales, respecto a un CEE óptimo de referencia para la industria analizada. Este CEE óptimo se refiere al CEE mínimo observado en una rama industrial o en una

---

$$\eta_e = \frac{\text{Energía primaria empleada para la generación [PJ]}}{\text{Electricidad generada - pérdidas por transformación y distribución [PJ]}}$$

<sup>28</sup> Philipsen, G.J.M., et. al, 1998, *Op. cit.*, p. 39

planta en el mundo al emplear la mejor tecnología disponible para un año determinado. En principio, todas las plantas de dicha rama industrial podrían alcanzar este nivel de eficiencia energética óptimo por lo que es importante considerarlo como punto de referencia.

Este punto de referencia es determinado de acuerdo al objetivo del análisis para reducir el CEE y del nivel de eficiencia energética que se desee alcanzar. Así, el CEE óptimo puede definirse como:

- El CEE de la mejor planta observada, cuando se refiere a la producción completa de la planta con el menor consumo específico de energía que actualmente está operando.
- El CEE de la mejor práctica, cuando se refiere a la producción de la planta con el menor consumo específico de energía que puede ser fabricada con la mejor tecnología probada a costos razonables.
- El CEE de la mejor tecnología, cuando se refiere a la producción de la planta con el menor consumo específico de energía que puede ser fabricada con la mejor tecnología.

Es importante destacar que el CEE óptimo de referencia varía de acuerdo a la introducción de la tecnología más eficiente en cada industria, por lo que sólo es válido para un año específico.

En un nivel agregado, el CEE de referencia se calcula de manera análoga al CEE compuesto de una rama industrial:

$$CEE_{mp} = \sum_{k=1}^{k=n} CEE_{mp,k} \cdot \frac{P_k}{P_T} \quad (1.27)$$

donde  $CEE_{mp}$  es el CEE compuesto de la "mejor práctica" de la rama industrial con  $n$  procesos, expresado en GJ/ton

$CEE_{mp,k}$  es el CEE de la "mejor práctica" para el proceso  $k$  (cada proceso debe tener definidos tanto el tipo de materia prima empleada como el tipo de producto manufacturado) en GJ/ton

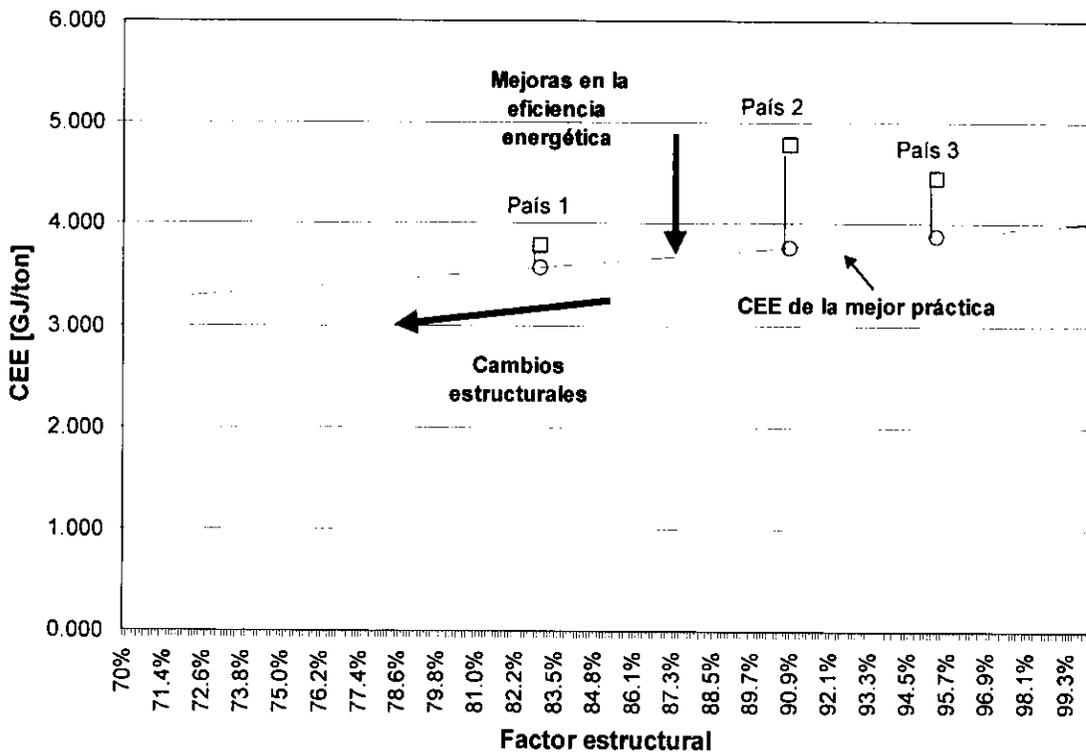
$P_k$  es el volumen de producción del producto fabricado en el proceso  $k$ , medido en toneladas  
 $P_T$  es el volumen total de producción de toda la rama industrial, también medido en toneladas

Para establecer el potencial de eficiencia energética de diferentes países y para realizar una comparación entre ellos es necesario tomar en cuenta los efectos estructurales que influyen para cada país; por lo que para cada rama industrial tanto el CEE actual como el CEE de referencia se calculan y se representan gráficamente como una función que depende de uno o varios factores estructurales.

Por ejemplo en la industria del cemento, el factor estructural considerado es la proporción de clinker en el cemento, la cuál tiene una relación directamente proporcional al consumo de energía en esta industria. Al analizar la industria cementera de  $n$  países diferentes, el valor del CEE actual se compara con el  $CEE_{mp}$  de esta industria. En la representación gráfica, la variable independiente que es el factor estructural se coloca en el eje de las abscisas y la variable dependiente que es el CEE se coloca en el eje de las ordenadas, como se muestra en la gráfica 1.1.

Los puntos superiores ■ representan el CEE actual y los puntos inferiores ○ el CEE de referencia para cada país. Como se observa, la diferencia entre el CEE actual y el CEE de referencia es una medida del potencial técnico de eficiencia energética para cada país de acuerdo a su estructura, y la diferencia relativa entre países permite su comparabilidad.<sup>29</sup> Como se observa en la gráfica 1.1, la disminución del CEE se puede lograr mediante cambios estructurales y el mejoramiento de la eficiencia energética.

Es importante mencionar que el mejoramiento de eficiencia energética en una rama industrial se lleva a cabo a través de la construcción de nuevas plantas o con medidas específicas de mantenimiento del equipo e inversiones en tecnología eficiente para ciertos procesos.



Fuente: Worrell, E., et. al., 1995, "Internacional Comparison of Energy Efficiency Improvement in the Cement Industry" en *Proceedings ACEEE 1995 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Washington, D.C., E.U.A.

**Gráfica 1.1 Consumo específico de energía en función de parámetros estructurales**

<sup>29</sup> Philipsen, D., et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 37

### **1.3 Descripción de la metodología para la Industria Siderúrgica**

Para analizar los factores que influyeron en la disminución del CEE así como la reducción de las emisiones específicas de carbono en la industria siderúrgica mexicana se detallan las fronteras del sistema energético consideradas por el BNE, y posteriormente se describen las metodologías del análisis de descomposición así como la metodología de Comparaciones Internacionales del análisis de estructura-eficiencia que se emplean en el capítulo 3 para explicar los factores que originaron dicha reducción.

#### **1.3.1 Fronteras del sistema**

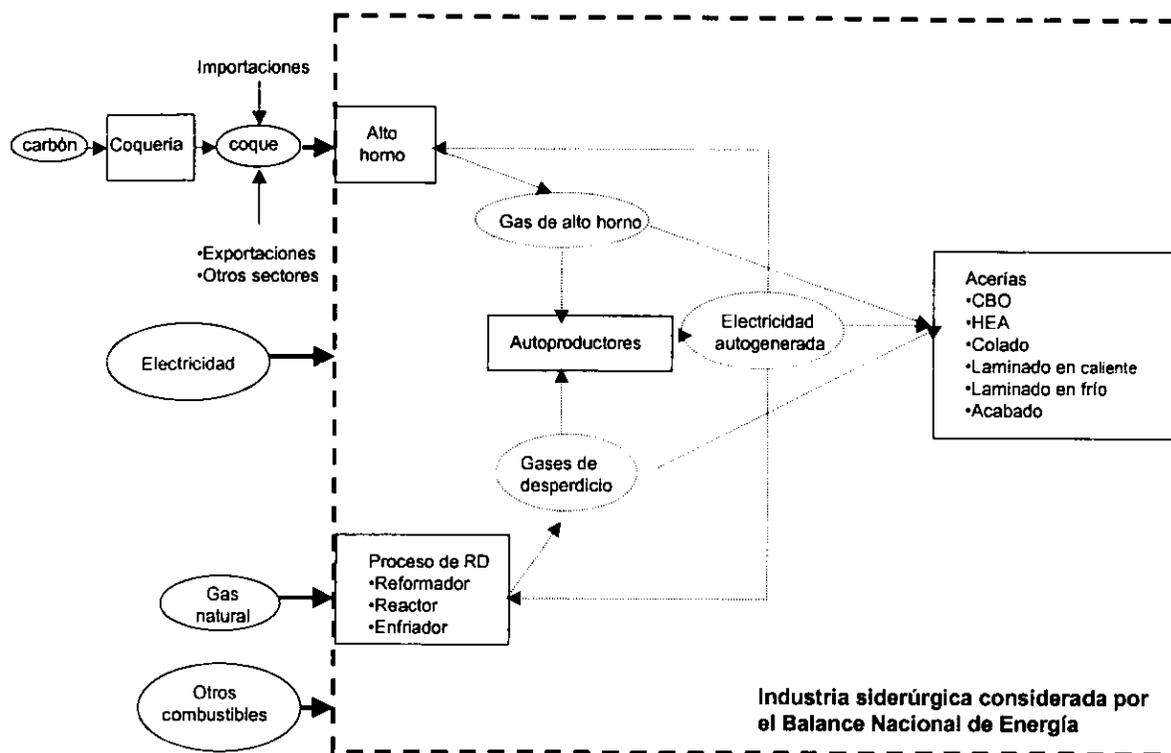
Como se describe en el capítulo 3, el proceso de fabricación del acero se divide en dos etapas: la manufactura del hierro y la fabricación del acero.

En la manufactura del hierro, los principales procesos empleados en la industria siderúrgica mexicana para la reducción de los óxidos presentes en el mineral de hierro son: el de alto horno que produce el arrabio y el de reducción directa que produce el fierro esponja. El coque es utilizado como combustible y agente reductor en el proceso de alto horno, mientras que en el proceso de reducción directa se utiliza el gas natural.

En la fabricación del acero, el arrabio es procesado en el horno de hogar abierto o en el convertidor básico de oxígeno y el fierro esponja y/o la chatarra se procesan en el horno eléctrico de arco. Posteriormente el acero líquido es colado en lingotes o en forma continua donde se obtienen productos semiacabados: planchones, palanquillas y tochos. De acuerdo a las especificaciones requeridas, los productos semiacabados son laminados en caliente y posteriormente en frío si es necesario y finalmente pasan a una etapa de acabado.

Los indicadores empleados para la industria siderúrgica mexicana se calculan con base en la energía neta comprada como se reporta en el BNE. En la figura 1.2 se presenta el esquema de consumo de energía en esta industria. Los procesos de transformación están encerrados en rectángulos, mientras que los combustibles están encerrados en círculos. Las líneas punteadas en el interior del cuadro indican los flujos de combustibles producidos dentro de la industria siderúrgica, pero que no son reportados por el BNE.

Cabe aclarar que la transformación del carbón metalúrgico en coque se reporta en el sector de transformación del BNE, donde además se reportan las exportaciones e importaciones de este combustible.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 1.2 Fronteras del sistema energético de la industria siderúrgica mexicana de acuerdo con el Balance Nacional de Energía**

### 1.3.2 Metodología del análisis de descomposición

Para entender los factores que influyen en el consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana se utilizó el método propuesto por Farla.<sup>30</sup> El consumo de energía de esta industria es función de la producción (actividad), la composición de su producción y el tipo de procesos empleados en esta industria (estructura) y la eficiencia energética en los procesos de producción.

Como se mencionó anteriormente, siguiendo la recomendación de la metodología de Comparaciones Internacionales se emplearon unidades físicas para los indicadores de actividad, estructura y eficiencia energética. De acuerdo con la pirámide de indicadores de eficiencia energética y con la disponibilidad de datos del consumo de energía, los indicadores calculados para la industria siderúrgica son agregados en un nivel de rama industrial. Sin embargo, debido a que la composición de la producción cambia a través del tiempo y es diferente entre países, se propone que en lugar de sumar todos los productos siderúrgicos se calcule un promedio

<sup>30</sup> Farla, J., et. al., 1995, *Op. cit.*, p. 746.

ponderado que considere un factor de peso para cada producto siderúrgico.<sup>31</sup> A este promedio se le conoce como Índice de producción física (IPF).

$$IPF = \sum_{i=1}^n P_i \cdot CEE_{B P i} \quad (1.28)$$

En el caso de la industria siderúrgica los factores de ponderación se fundamentan en la energía consumida utilizando la "mejor práctica" existente para producir cada producto siderúrgico.

Los diferentes productos siderúrgicos considerados son: arrabio, fierro esponja, acero primario producido en el CBO, el acero secundario producido en el HEA, el acero rolado en caliente y el acero rolado en frío. En la tabla 1.3 se presentan los consumos específicos de la "mejor práctica" para fabricar estos productos.

De acuerdo a la ecuación 1.4 y empleando la definición del PPI, el consumo de energía en la industria siderúrgica se calcula de la siguiente manera:

$$\sum E = \sum P \cdot \frac{IPF}{\sum P} \cdot \frac{\sum E}{IPF} \quad (1.29)$$

donde la suma sencilla de los diferentes productos  $\sum P$  es el parámetro de actividad; el parámetro de la estructura está basado en el IPF, y está dado por  $IPF/\sum P$ ; finalmente el parámetro de eficiencia energética de los procesos de producción está dado por  $\sum E/IPF$ .

Debido a la disponibilidad de datos, se analizó el consumo energético de la industria siderúrgica mexicana de 1970 a 1995 empleando las aproximaciones mencionadas en el inciso 1.1. Sin embargo, debido a que la producción de acero aumentó aceleradamente y el periodo de estudio es largo, la influencia del efecto del parámetro de actividad resultó mayor que los otros efectos lo que no permitió analizar adecuadamente los efectos estructurales y de eficiencia energética. Por lo tanto se empleó la aproximación del consumo específico de energía de acuerdo a las definiciones de estructura y eficiencia energética descritas en la ecuación 1.29 y se examinaron las influencias de los cambios en estas dos variables en el periodo estudiado conforme a las ecuaciones 1.10, 1.11, 1.12 y 1.14.

$$CEE = \frac{IPF}{\sum P} \cdot \frac{\sum E}{IPF} \quad (1.30)$$

De acuerdo a la clasificación de Ang<sup>32</sup> se utilizó la técnica aditiva del análisis de la intensidad energética y el método paramétrico de Divisa basado en los índices del promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base para analizar los factores que contribuyeron a disminuir el CEE en la industria siderúrgica mexicana debido a su pequeño residuo.

<sup>31</sup> Worrell, E., et. al., 1997, *Op. cit.*, p. 733

<sup>32</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091

Tabla 1.3 Consumo específico de energía para la mejor práctica de los siguientes procesos empleados en la industria siderúrgica

Proceso <sup>33</sup>	Combustible [GJ/ton acero]	Electricidad [GJ <sub>e</sub> /ton acero]	Energía primaria <sup>34</sup> [GJ <sub>p</sub> /ton acero]
Alto horno <sup>35</sup>	15.19	0.26	15.98
Reducción directa <sup>36</sup>	11.19	0.17	11.71
Convertidor básico al oxígeno + colado <sup>37</sup>	0.57	0.12	0.93
Horno de arco eléctrico + colado <sup>38</sup>	0.79	1.52	5.39
Laminado en caliente <sup>39</sup>	1.82	0.37	2.94
Laminado en frío <sup>40</sup>	1.10	0.53	2.71

Para analizar las emisiones específicas de carbono de la industria siderúrgica mexicana, las emisiones específicas se analizaron en función de su estructura, su eficiencia energética, y del producto de su mezcla de combustibles y los coeficientes de emisión de carbono.

$$\left(\frac{E_m}{P}\right) = \left(\frac{IPF}{\sum P}\right) \left(\frac{\sum E}{IPF}\right) \left(\sum FEC_j \cdot \frac{E_j}{\sum E}\right) \quad (1.31)$$

donde  $IPF/\sum P$  es el parámetro de estructura,  $\sum E/IPF$  es el parámetro de eficiencia energética y el factor  $(\sum FEC_j \cdot E_j/\sum E)$  permite observar los cambios debidos a la sustitución de combustibles tanto en la industria siderúrgica como en la generación de electricidad.

Para examinar la influencia de estos cambios en las emisiones específicas de carbono también se empleó el método paramétrico de Divisa basado en los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base.

<sup>33</sup> Para el proceso de reducción directa se fundamentó en una planta HYLSA de México (McAloon, 1993, "Hylsa aims high with Monterrey modernization", en *Iron & Steel Magazine*, vol. 20, no. 7, p. 44-47).

<sup>34</sup> Para el cálculo de la energía primaria se consideró una eficiencia de generación de electricidad del 33%.

<sup>35</sup> Se consideró el CEE de la "mejor práctica" para el proceso de alto horno (incluyendo la peletización y sinterización) de una planta integral de Holanda para e1988. Se alimentan al alto horno 50% de pelets y 50% de material sinterizado (Worrell, 1994, *Op. cit.*, p. 54)

<sup>36</sup> El CEE de la "mejor práctica" para el proceso de reducción directa incluye la peletización y se basó en un planta HYLSA de Mexico. Se introduce en el horno 1.23 ton de pelets/ton de hierro esponja producido (McAloon, 1993, *Op. cit.*, p. 45).

<sup>37</sup> Se consideró el CEE de la "mejor práctica" para el convertidor básico al oxígeno y el colado continuo de una planta de Holanda para 1988 (Worrell, 1994, *Op. cit.*, p. 55-56)

<sup>38</sup> El CEE conjunto del horno de arco eléctrico y del colado continuo se refiere a una planta en Alemania (Worrell, E... et. al., 1997, *op. cit.*, p. 731)

<sup>39</sup> El CEE del rolado en caliente de la mejor práctica se basó en una planta integrada de Holanda (Worrell, 1994, *Op. cit.*, p. 56-57)

<sup>40</sup> El CEE del rolado en frío de la mejor práctica se refiere al de una planta integrada en Holanda (Worrell, 1994, *Op. cit.*, p. 57)

### 1.3.3 Metodología del análisis estructura - eficiencia

La metodología de Comparaciones Internacionales señala que el consumo específico de energía para fabricar el acero está influido principalmente por 3 factores: el tipo de materia prima empleado (mineral de hierro y chatarra para la fabricación del acero primario o exclusivamente chatarra para el acero secundario), el tipo de productos finales (láminas planas, perfiles, barras, varilla corrugada, etc.) y la eficiencia del proceso de fabricación.<sup>41</sup>

Con el objetivo de entender la contribución de estos factores en los cambios del CEE y comparar el CEE respecto a otros países, la metodología de Comparaciones Internacionales recomienda representar al CEE como una función de los cambios en la estructura y en la eficiencia energética. Para el caso de México, donde la producción de HRD es significativa, resulta mejor emplear el tipo de materia prima como factor estructural; de manera más específica, la cantidad de chatarra tanto en las plantas integradas para la fabricación de acero primario como en las plantas semi integradas para la fabricación de acero secundario. Esto se visualiza mejor a través de su representación gráfica, dibujando el CEE actual y el CEE de la "mejor práctica" que considera la composición de la producción y de los tipos de procesos a través del IPF contra el factor estructural, es decir, la cantidad de chatarra introducida en el proceso de fabricación.

A través de la diferencia entre el CEE actual y el CEE de la "mejor práctica" se estimó el potencial técnico de eficiencia energética en la industria siderúrgica mexicana para 1995. Finalmente de esta manera, la comparación de la eficiencia energética a lo largo de un periodo de tiempo y entre países toma en cuenta la estructura de la industria en cada país y permite recomendar medidas de eficiencia que pueden mejorar su nivel actual.

Asimismo, el consumo de chatarra de la industria siderúrgica mexicana se empleó para analizar el CEE actual y el CEE de la "mejor práctica" entre 1985 a 1996; y se realizó una comparación entre países de su CEE actual y de la "mejor práctica" de acuerdo a su estructura para 1990.

## 1.4 Descripción de las metodologías empleadas para la Industria del Cemento

En este inciso se describen las metodologías empleadas en la industria del cemento. Se divide en cuatro partes. La primera describe brevemente el proceso de fabricación del cemento en México y las fronteras del sistema energético consideradas por el BNE. Después se definen los indicadores de actividad, estructura y eficiencia energética empleados en esta industria de acuerdo a la recomendación de la Metodología de Comparaciones Internacionales. Posteriormente se

---

<sup>41</sup> Worrell, E., et. al., 1997, *Op. cit.*, p. 730-731

explica la metodología del análisis de descomposición que se empleó para estudiar las influencias de los cambios en los indicadores antes mencionados sobre el CEE y las emisiones específicas de carbono de esta industria. Finalmente se describe la metodología del análisis de estructura-eficiencia, definiendo el factor estructural más representativo en la fabricación del cemento y las consideraciones para estimar el potencial de ahorro de energía para esta rama industrial.

#### **1.4.1 Fronteras del sistema**

La industria del Cemento en México emplea casi en su totalidad el proceso seco, sólo una planta cuya capacidad instalada representó el 0.5% de la producción nacional en 1995 sigue fabricando cemento a través del proceso húmedo.<sup>42</sup> En el capítulo 4, se explica con mayor profundidad los procesos de fabricación del cemento.

El BNE reporta la energía neta comprada por la industria cementera mexicana a PEMEX y CFE como consumo final de energía de esta industria. A continuación se presenta en la figura 1.3, el flujo de combustibles y electricidad de acuerdo al BNE. Los procesos de transformación están encerrados en rectángulos, mientras que los combustibles están encerrados en círculos.

En algunas plantas se queman llantas de desecho o aceites y lubricantes usados como combustible alternativo en los hornos rotatorios de cemento. Sin embargo, aún no existen normas ecológicas, ni un sistema de recolección y transporte adecuado que regule el uso de éstos en los hornos rotatorios por lo que su consumo es poco significativo y no es reportado por el BNE.

#### **1.4.2 Indicadores de la industria del cemento**

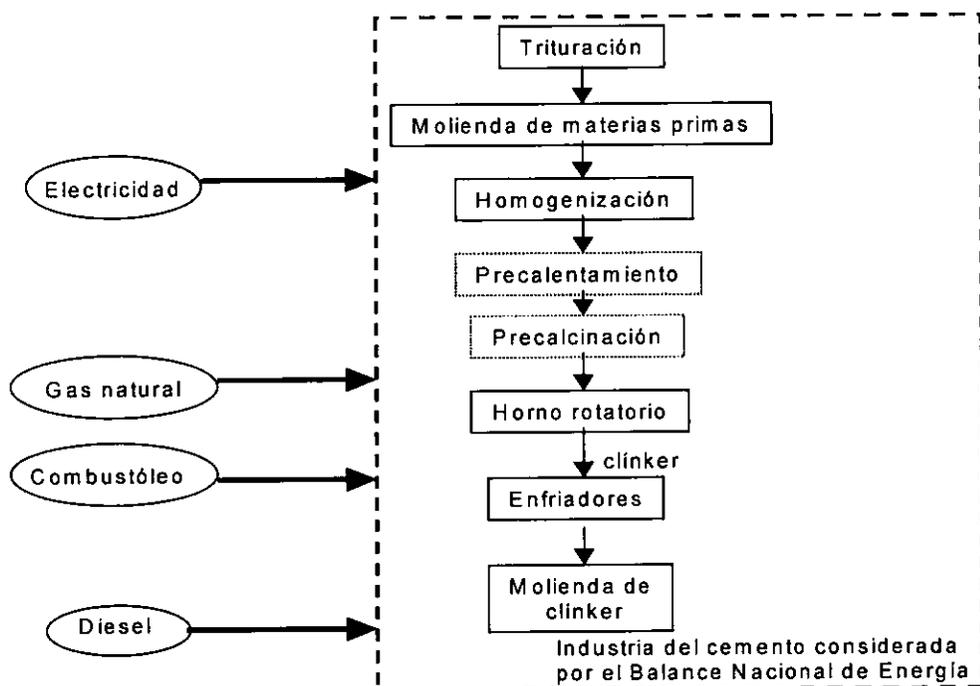
El consumo de energía en la industria del cemento es función de la producción (actividad), de la composición de la producción (estructura) y de la eficiencia energética del proceso empleado.

De acuerdo con la pirámide de indicadores de eficiencia energética y la información disponible, los indicadores para la industria del cemento en México se calculan en un nivel agregado de rama industrial. Así, la actividad se mide en toneladas de clínker o de cemento producido; y el CEE en GJ de combustible por tonelada producida. Los factores estructurales que influyen en el consumo de energía de esta industria dependen de la materia prima introducida y de los diferentes tipos de cemento producidos. El tipo de cemento fabricado depende de la proporción del clínker en el cemento respecto a otros aditivos como son: yeso, puzolanas, escoria de alto horno, cenizas volantes, etc. En un nivel agregado, se consideró que la relación de la producción de clínker respecto a la producción de cemento es el factor estructural más importante. Por otra parte, la etapa que más consume energía en el proceso de fabricación es la producción de clínker

---

<sup>42</sup> CEMBUREAU, 1997, World Cement Directory 1996, Bruselas, Bélgica.

por lo que la cantidad producida, importada o exportada de clínker también representa un factor estructural importante.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 1.3 Fronteras del sistema energético de la industria del cemento de acuerdo al Balance Nacional de Energía**

Finalmente se considera el tipo de proceso empleado como factor explicativo. Es importante mencionar que el proceso seco es más eficiente que el proceso húmedo, más aún si se utilizan precalentadores y precalcinadores.

#### 1.4.3 Metodología del análisis de descomposición

Para entender los factores que influyen en el consumo de energía, así como en el consumo específico de energía de la industria cementera mexicana se empleó el método del análisis de descomposición descrito para la industria siderúrgica.

Para explicar estos cambios se recomienda representar el CEE en función de sus factores estructurales. En este caso, el factor estructural más representativo es la proporción clínker-cemento, el cuál varía con el tiempo y es diferente para cada país. Se propone utilizar el IPF presentado en la ecuación 1.28, en el cuál el factor ponderador es la energía que se emplearía al producir cemento con la mejor tecnología disponible. En la tabla 1.4 se presentan el CEE de la mejor práctica en el proceso de fabricación del cemento donde se consideran la etapa de

fabricación de clínker y el secado de los aditivos para el consumo de combustibles; y la molienda de cemento y la de aditivos para el consumo de electricidad.

**Tabla 1.4 Consumo específico de energía de la mejor práctica para las diferentes etapas en la manufactura del cemento**

	CEE <sub>combustible</sub> [GJ/ton clínker]	CEE <sub>e</sub> [GJ <sub>e</sub> /ton cemento]
Producción de clínker <sup>43</sup>	3.03	
Molienda de materias primas y de cemento <sup>44</sup>		0.35
Secado de la escoria de alto horno <sup>45</sup>	0.75	
Molienda de aditivos <sup>46</sup>		0.24

$$IPF_{comb} = P_{cem} \cdot \left( \% \text{ clínker} / \text{cemento} \right) \cdot CEE_{mp, clínker} + P_{cem} \cdot \left( 1 - 0.05 - \% \text{ clínker} / \text{cemento} \right) \cdot CEE_{mp, aditivo} \quad (1.32)$$

$$IPF_{elec} = P_{cem} \cdot \left( \% \text{ clínker} / \text{cemento} \right) \cdot CEE_{mp, molienda} + P_{cem} \cdot \left( 1 - \% \text{ clínker} / \text{cemento} \right) \cdot CEE_{mp, molienda aditivo} \quad (1.33)$$

De esta manera, el CEE para la industria del cemento tomando en cuenta la composición de su producción a través del IPF se calculó como:

$$CEE_p = \left( \frac{IPF_p}{\sum P} \right) \cdot \left( \frac{\sum E}{IPF_p} \right) \quad (1.34)$$

Debido a la disponibilidad de datos de la producción de clínker, el análisis del consumo específico de energía se realizó únicamente entre 1981 y 1995, y se calcularon los índices de promedio simple (AVE-PDM2), debido a su pequeño residuo, para estimar la influencia de la estructura y la eficiencia energética en el CEE de acuerdo a las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12.

Es importante mencionar que las emisiones de carbono en esta industria toman en cuenta las emisiones debidas tanto a la decarbonatación de las materias primas como a la combustión en la fabricación del clínker.

$$Em = (0.136) \cdot \left( \% \text{ clínker} / \text{cemento} \right) \cdot P_{cem} + \sum_j E_j \cdot CEF_j \quad (1.35)$$

<sup>43</sup> Se consideró como el CEE de la mejor práctica para la producción de clínker vía seca el de una planta de Hualien, Taiwan en 1993. Emplea un horno rotatorio corto (relación logitud-diámetro 11:1) que cuenta con un precalentador de 4 etapas y un precalcinerador dual (Chang, T., 1994, "Successful operation of the world's only 5000 tpd short rotary kiln" en *World Cement*, septiembre, Inglaterra, p. 9-11).

<sup>44</sup> El CEE considerada como de la mejor práctica se refiere a la de la planta de Tepeaca, México. Considera que la molienda de materias primas se realiza en molinos verticales; mientras que la molienda de cemento se lleva a cabo en molinos de bolas (Turley, W., 1995, "Mexican Mammoth" en *Rock products Cement Edition*, E.U.A., p. 24).

<sup>45</sup> Worrell, E., et. al., 1995, "Internacional Comparison of Energy Efficiency Improvement in the Cement Industry" en *Proceedings ACEEE 1995 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Washington, D.C., E.U.A., p. 127

<sup>46</sup> Worrell, E., et. al., 1995, *Op. cit.*, p. 127

donde 0.136 toneladas de carbono por tonelada de clínker es el factor de emisión de carbono debido a la decarbotación de las materias primas,<sup>47</sup>  $P_{cem}$  es la producción de cemento en toneladas,  $E_j$  es el consumo de energía del combustible  $j$  y  $CEF_j$  es el factor de emisión de carbono del combustible  $j$ .

Por otra parte, se analizaron las emisiones específicas de carbono debidas únicamente a la combustión en el proceso de fabricación calculadas con el método de descomposición descrito en la ecuación 1.31 y se estimó la influencia de la estructura, la eficiencia energética y de la sustitución de combustibles tanto en esta industria como en la generación de electricidad a través de las ecuaciones 1.19, 1.20, 1.21 y 1.22.

#### 1.5.4 Metodología del análisis estructura-eficiencia

De acuerdo con la metodología de comparaciones internacionales, el consumo específico de energía de la industria cementera depende de los siguientes factores: de la materia prima introducida (clínker y aditivos), del tipo de cementos producidos (Portland y puzolánico) y de la eficiencia energética del proceso empleado.

Como se mencionó anteriormente, la etapa más intensiva en el uso de la energía así como la más contaminante dentro del proceso es la fabricación del clínker, y de la disponibilidad de éste y de los aditivos depende la manufactura de los diferentes tipos de cemento. Por lo que el factor estructural más importante para disminuir el CEE es la proporción de la producción de clínker en la producción de cemento. Por ejemplo, para la fabricación del cemento Portland se requiere entre un 90 y un 95% de clínker, lo restante son yeso y otros compuestos;<sup>48</sup> para el cemento Portland puzolánico se requiere entre un 65% a un 80 % de clínker, de un 15 a un 30% de puzolanas y un 5% de yeso;<sup>49</sup> para el cemento escoria de alto horno, la cantidad de clínker requerida puede variar entre un 25 y un 75%, de 20 a 70% de escoria granulada y un 5% de yeso.<sup>50</sup>

Para analizar la influencia de los cambios estructurales y de eficiencia energética que contribuyeron a la disminución del CEE en la industria del cemento en México, se representó gráficamente su CEE real entre 1981 y 1995 respecto al CEE de la "mejor práctica" tomando en cuenta los cambios en la composición de la producción a través del tiempo empleando el IPF.

Además se comparó el CEE real de la industria cementera de diferentes países respecto al CEE de la mejor práctica de acuerdo a su propia estructura.

Finalmente, se calculó el potencial técnico de eficiencia energética para la industria cementera mexicana en 1995 como la diferencia de su CEE real y el CEE de la "mejor práctica".

<sup>47</sup> Worrell, E., et. al., 1995, *Op. cit.*, p. 127

<sup>48</sup> De acuerdo a la NOM-C-1-80

<sup>49</sup> De acuerdo a la NOM-C-2-1986

<sup>50</sup> De acuerdo a la NOM-C-184-70

## 1.5 Conclusiones

En este capítulo se describieron las metodologías empleadas en este trabajo para examinar el sector industrial agregado, la industria siderúrgica y la industria del cemento. De los diversos índices de cambio que existen para analizar el consumo de energía y la intensidad energética industrial, de acuerdo con la clasificación de Ang, se seleccionó la aproximación con la cuál se obtuvo el menor residuo. Bajo este criterio se emplearon los índices de promedio simple utilizando el método paramétrico de Divisia (AVE-PDM2) para analizar el consumo de energía tanto del sector como de las ramas industriales mencionadas. Es importante mencionar que cuando se analiza el consumo de energía para periodos muy largos donde el nivel de producción crece aceleradamente, el efecto de la actividad en el consumo de energía es considerablemente mayor que el de los cambios estructurales o de la intensidad energética por lo que se empleó el análisis de la intensidad energética o del consumo específico de energía para las industrias mencionadas.

Sin embargo, se observó que en un nivel agregado de sector industrial y con la metodología del análisis de descomposición no se puede estimar el impacto total del efecto estructural o de la intensidad energética en el consumo de energía de este sector; ya que al desagregar el impacto de este efecto en las ramas industriales, cada una de ellas sigue un patrón diferente entre ellas e incluso respecto al del sector industrial nacional. La mejor aproximación para poder estimar el impacto total del efecto estructural y de la intensidad energética se obtiene en niveles de agregación más bajos, es decir, a nivel de los procesos industriales.

Así, el análisis de estructura-eficiencia recomendado por la metodología de Comparaciones Internacionales se empleó para examinar únicamente a la industria siderúrgica y la del cemento empleando indicadores físicos, ya que éstos proporcionan una visión más clara de las diferencias técnicas entre los distintos sectores y los diversos países; y estudian los factores que influyen en mayor medida sobre el consumo de energía y el  $CEE_p$  para cada una de estas industrias de acuerdo a las materias primas empleadas, los tipos de productos finales fabricados, los procesos de fabricación y la eficiencia energética de los procesos empleados. La principal ventaja de esta metodología es que permite comparar el  $CEE_p$  y el potencial de mejoramiento de eficiencia energética de estas industrias en el tiempo y entre varios países de acuerdo a sus propias estructuras de producción.

## Capítulo 2

### **Análisis del consumo energético del sector industrial mexicano**

En el presente capítulo se analizan los factores que promovieron los cambios en el consumo de energía del sector industrial, a través de una metodología de índices de cambio, basada en indicadores económicos (PIB sectorial). Para ello, la discusión se divide en tres partes. En la primera, se describen diferentes definiciones de energía y las fronteras del sistema para los indicadores de actividad, estructura, intensidad energética e intensidad de emisiones de carbono. En la segunda parte, se analiza el sistema considerado la producción para cada rama industrial. Finalmente en la tercera parte, se analizan los cambios en las diferentes variables que influyeron en las variaciones del consumo energético, de la intensidad energética y de la intensidad de emisiones de carbono del sector industrial empleando la metodología del análisis de descomposición.

Es importante mencionar que el sector industrial mexicano aporta cerca del 24% del valor agregado nacional, representa 35% del consumo de energía final y una proporción similar de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo de energía.

Entre 1970 y 1995, el consumo de energía primaria y las emisiones de carbono de este sector aumentaron a una tasa anual de 4.2% y 4.5% respectivamente; mientras la intensidad energética se incrementó de 8.9 a 11.0 MJ/dólar de 1990 y la intensidad de emisiones creció de 143 a 192 g de C/dólar de 1990.

## 2.1 Definiciones del consumo de energía y las fronteras de los sistemas energéticos para el sector industrial

La eficiencia energética en el sector industrial se mide a través de la cantidad de energía que se requiere para fabricar una tonelada de cierto producto específico. Los indicadores de eficiencia energética, tanto los físicos como los económicos, constan de un numerador y un denominador. En el numerador se mide el consumo de energía, el cuál puede ser definido de varias maneras: energía útil, energía por usos finales, energía neta disponible, energía comprada, energía final, demanda de energía primaria; mientras que en el denominador se mide la producción del sector o de la rama industrial ya sea en términos económicos o físicos.

Las definiciones del consumo de energía se determinan de acuerdo a las fronteras del sistema y a la manera en que se miden:

- La energía útil es la fracción de la energía realmente empleada en un proceso respecto a la energía de entrada o consumida en dicho proceso. Esta diferencia se debe a pérdidas de energía hacia los alrededores, en reacciones químicas, caídas de presión y otras irreversibilidades.

$$\text{Energía útil} = \text{energía final} \cdot \eta\% \quad (2.1)$$

donde  $\eta\%$  es la eficiencia global la cuál involucra estas pérdidas.

- La energía de uso final mide la energía utilizada por cada aplicación final. Se obtiene a través de encuestas para conocer el consumo de energía actual y los datos más importantes del equipo empleado como son: la frecuencia de uso, el tamaño, etc.; de esta manera se puede determinar cuáles son los usos finales más importantes en hogares, edificios, vehículos e incluso para procesos industriales complejos.<sup>51</sup>
- La energía final es la energía comprada por los usuarios finales, tomando en cuenta las conversiones a otra forma de energía que se lleva a cabo dentro de las instalaciones del usuario final.<sup>52</sup> La manera más fácil de contabilizarla es:

$$\text{Energía final} = \text{Energía comprada} - \text{energía consumida para la conversión dentro de la planta} + \text{energía producida dentro de la planta} \quad (2.2)$$

- La energía neta comprada es la cantidad neta comercializada por los usuarios de un mismo sector, incluye algunos combustibles transformados en cada rama industrial como es el bagazo de caña en la industria azucarera o el coque en la industria siderúrgica; siendo ésta la que generalmente se encuentra reportada en las estadísticas nacionales.<sup>53</sup>

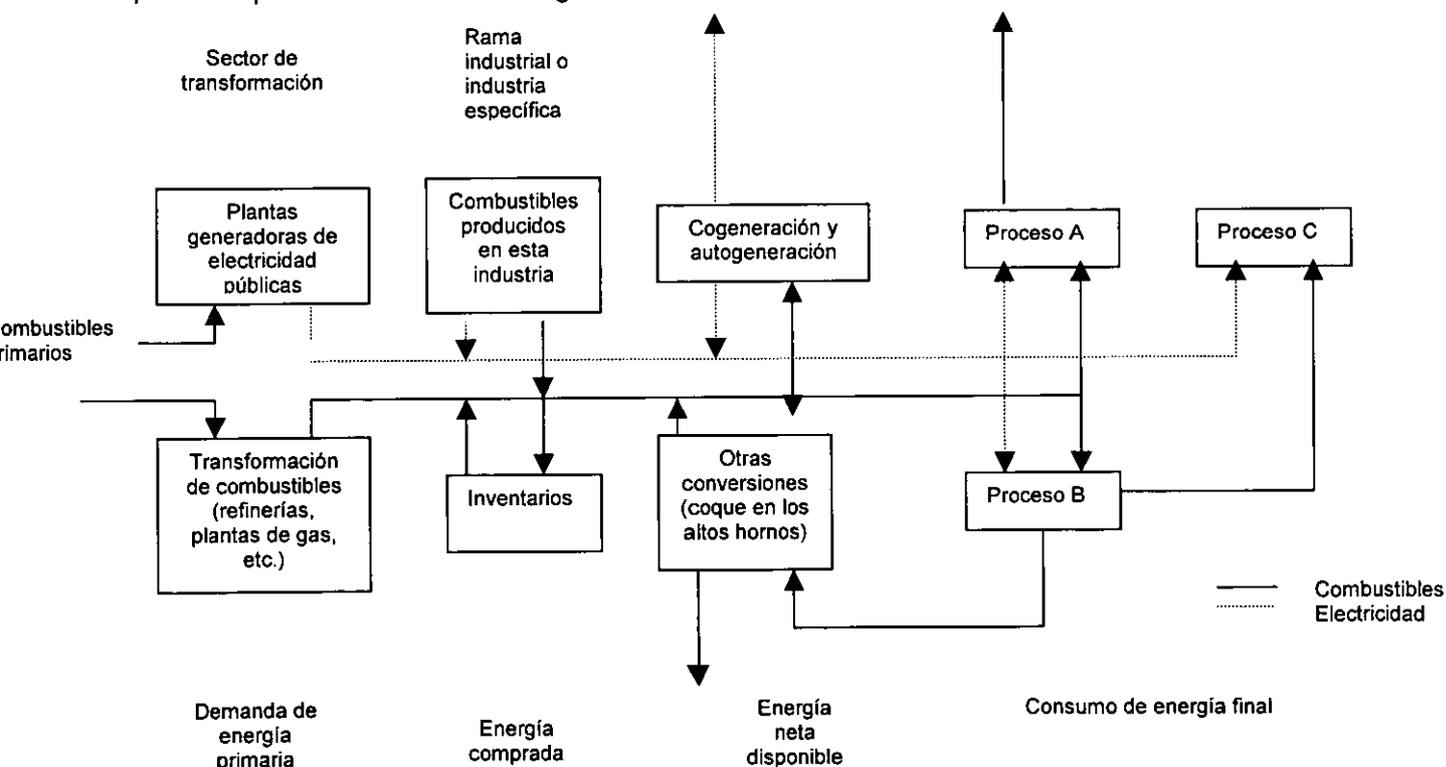
<sup>51</sup> Philipsen, 1998, *Op. cit.*, p. 6

<sup>52</sup> Philipsen, 1998, *Op. cit.*, p. 6

<sup>53</sup> Philipsen, 1998, *Op. cit.*, p. 7

- La energía neta disponible es la cantidad de energía actualmente disponible por el usuario, a diferencia de la energía neta comprada, incluye los cambios en inventarios y la energía que vende a otros usuarios, por ejemplo, la electricidad cogenerada que se vende a la red eléctrica o subproductos como residuos, gas de alto horno en la industria siderúrgica, etc.<sup>54</sup>
- La energía primaria es aquella que proviene de fuentes primarias de energía, es decir, aquellas que no han pasado por ningún proceso de transformación, como son: el carbón, el petróleo, el gas (asociado y no asociado), la biomasa (leña, bagazo de caña) y las energías renovables (la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica y la hidroenergía). La demanda de energía primaria no puede ser medida, debe ser calculada tomando en cuenta los flujos de energía en el sector energético a partir del consumo final de energía o de la energía neta comprada. El cálculo consiste en sumar al combustible empleado el consumo de electricidad afectado por la eficiencia de conversión de las plantas generadoras (entre 30 y 40%).<sup>55</sup>

Gráficamente, las diferentes definiciones del consumo de energía antes mencionadas se pueden representar a través de la figura 2.1.



Fuente: Phylipsen, D., et al., 1998, *Handbook on International Comparisons of Energy Efficiency in the Manufacturing Industry*, Departamento de Ciencias, Tecnología y Sociedad, Universidad de Utrecht, Utrecht, Holanda, p. 8

**Figura 2.1 Representación esquemática de las diferentes definiciones de energía de acuerdo a las fronteras de los sistemas medidos**

<sup>54</sup> Phylipsen, 1998, *Op. cit.*, p. 7

<sup>55</sup> Phylipsen, 1998, *Op. cit.*, p. 7

## **2.2 Descripción del consumo final de energía para el sector industrial reportado por el Balance Nacional de Energía**

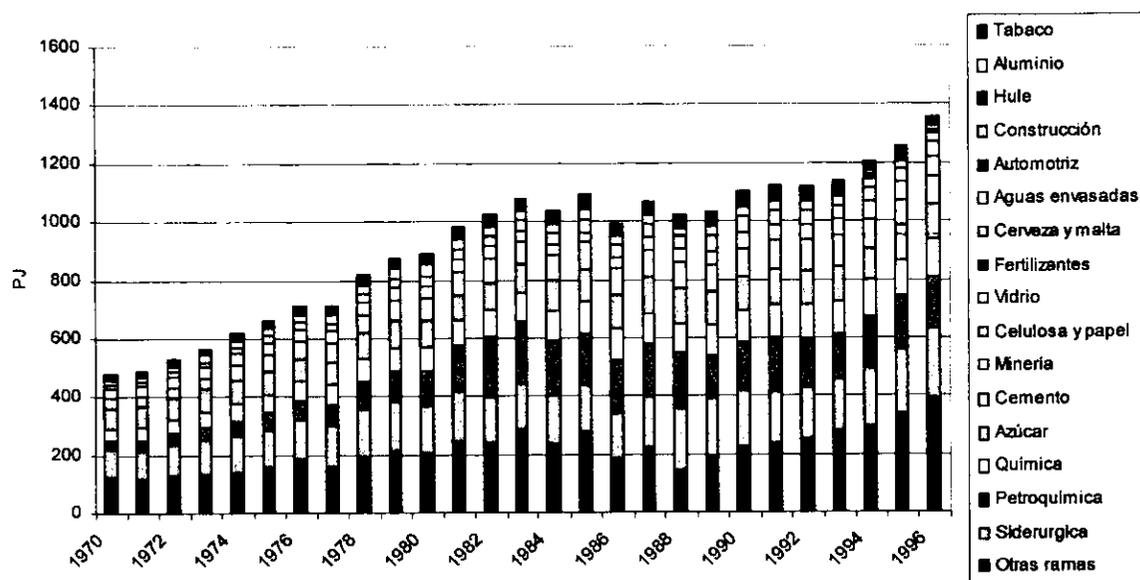
Para determinar si la disponibilidad de los datos de consumo energético es adecuada para cumplir con el objetivo del análisis propuesto, es fundamental comprender la manera en que estos datos están reportados en las estadísticas nacionales, conocer su definición y sus fronteras.

El Balance Nacional de Energía (BNE) reporta la energía neta comprada principalmente a PEMEX y CFE desagregada en los diferentes combustibles fósiles, biomasa (exclusivamente bagazo de caña para la industria azucarera) y electricidad. Una de las principales ventajas de la descomposición del consumo de energía por combustibles es que permite calcular las emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante mencionar que a partir del BNE de 1996, el consumo final de energía en el sector industrial se reporta desde 1965 y emplea el valor calorífico inferior en la conversión de unidades físicas (toneladas de carbón, barriles de petróleo, etc.) a unidades energéticas (PJ).

Asimismo, el consumo final de energía del sector industrial reportado en el BNE incluye los combustibles que se utilizan tanto en los procesos de fabricación como en la cogeneración y en la autogeneración de electricidad sin ninguna especificación, es decir, el BNE no proporciona datos de los combustibles empleados en cada uno de estos procesos. Si se desea obtener la energía final, es necesario realizar varias suposiciones acerca de los combustibles utilizados y la eficiencia de conversión en cada rama industrial.

Las ramas industriales más intensivas en el uso de la energía consideradas por el BNE son: siderúrgica, petroquímica PEMEX, química, azúcar, cemento, minería, celulosa y papel, vidrio, fertilizantes, cerveza y malta, aguas envasadas, automotriz, construcción, hule, aluminio y tabaco; y las restantes que por su bajo consumo energético o por su diversidad de productos finales, se concentran en un grupo residual bajo el nombre de otras ramas. A continuación se presenta la gráfica 2.1 que muestra la participación en el consumo final de energía de las ramas industriales antes mencionadas.

Para calcular los indicadores de eficiencia energética en este sector es importante especificar las industrias que forman parte de cada rama industrial para poder investigar su producción o valor agregado. Para ello, se comparó el BNE con el Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).



Fuente: SE, 1996, Balance Nacional de Energía, México, D.F.

**Gráfica 2.1 Consumo de combustibles de las ramas industriales reportadas en el Balance Nacional de Energía 1970-1995**

La industria siderúrgica en el Balance de Energía considera el consumo reportado por las acerías integradas, las miniacerías y las fundidoras y laminadoras. En el SCN corresponde a las industrias básicas de hierro y acero (rama 46 de la división VII de la Industria Manufacturera). Esta rama incluye la fundición y laminación primaria, la laminación secundaria y la fabricación de tubos, postes de hierro y acero.

La industria petroquímica PEMEX en el BNE considera el consumo energético de este organismo para la fabricación de petroquímicos secundarios: amoníaco, anhídrido carbónico, metanol, acetaldehído, cloruro de vinilo, dicloroetano, etileno, glicoles etilénicos, óxido de etileno, percloroetileno, polietileno, aromáticos pesados, aromina 100, benceno, cumeno, estireno, etilbenceno, fluxoil, ortoxileno, paraxileno, tolueno y xilenos. El valor agregado más cercano a lo que refleja el BNE corresponde a la rama de petroquímica básica (Rama 34). Sin embargo, en las Cuentas Nacionales el valor agregado de este grupo incluye tanto a la petroquímica básica como a la petroquímica secundaria de PEMEX sin poder separarlas.

La industria química en el BNE considera el consumo de energía de la química básica, resinas sintéticas y fibras químicas principalmente. Existe una gran dificultad para el cálculo del consumo energético de esta subrama debido a la diversidad de productos considerados. Para ello se realiza una encuesta a las empresas químicas, se contabiliza el consumo reportado por algunas de ellas y el resto se estima para toda la industria química a través de un modelo que emplea

variables económicas y de producción.<sup>56</sup> El valor agregado más cercano a lo que refleja el BNE corresponde a las ramas de química básica (rama 35); resinas sintéticas y fibras químicas (rama 37); productos farmacéuticos (rama 38); jabones, detergentes y cosméticos (rama 39), otros productos químicos (rama 40) y artículos de plástico (rama 41). Es importante mencionar que el consumo de energía de la petroquímica secundaria privada en el BNE se incluye en la química básica.

La industria del azúcar en el BNE considera la energía necesaria durante diversas etapas para la fabricación del azúcar. Es importante mencionar que el bagazo de caña, subproducto de esta industria, es utilizado como combustible para la generación de vapor en las calderas que es empleado tanto en los procesos como en la autogeneración de electricidad. El valor agregado que corresponde al Balance de energía es la rama 16.

La industria del cemento en el BNE considera la energía consumida durante las diversas etapas de la fabricación del cemento: trituración, molienda de materia prima, clinkerización, molienda de cemento y envasado. Algunas plantas de cemento queman llantas y combustibles alternos producidos a partir de aceites usados los cuáles no son considerados por el BNE. Uno de los principales obstáculos para el empleo y la contabilización de estos residuos es la falta de una norma ecológica que regule el uso de combustibles alternos en esta industria. El valor agregado que le corresponde es la manufactura de cemento hidráulico (rama 44).

La minería en el BNE considera la energía necesaria para la extracción y beneficio de carbón y grafito, mineral de hierro, minerales metálicos no ferrosos, arena y arcilla y otros minerales no metálicos reportados por la Cámara Minera de México. El valor agregado más cercano en el SCN corresponde a las ramas de extracción y beneficio de carbón y grafito (rama 5), extracción y beneficio de mineral de hierro (rama 7), extracción y beneficio de minerales metálicos no ferrosos (rama 8), explotación de canteras y extracción de arena y arcilla (rama 9) y extracción y beneficio de otros minerales no metálicos (rama 10).

El consumo de energía de la Industria de la Celulosa y Papel reportado en el BNE se refiere a la energía necesaria para la producción de papel y cartón, la cual involucra dos etapas: la transformación de las materias primas fibrosas (madera, bagazo de caña, algodón, bagazo de arroz, material reciclado) en celulosa y la fabricación del papel a partir de la celulosa. En algunas empresas emplean pequeñas cantidades de biomasa (licor negro) como combustible, el cual no es contabilizado en el BNE. El valor agregado correspondiente es exclusivamente la fabricación de papel y cartón (rama 31), se excluye imprentas y editoriales.

La industria del vidrio del BNE considera el consumo de energía utilizado en la manufactura de vidrio (plano liso, plano labrado, templado); cristal (flotado, inastillable); fibra de

---

<sup>56</sup> Comunicación personal con el Jefe del Departamento de Transformación Energética de la Secretaría de Energía, noviembre, 1998.

vidrio; botellas; frascos; tubos; ampollitas; cristalería y refractarios para uso comercial, industrial y del consumidor final, abasteciendo a las industrias de bebidas, alimentos, construcción y automotriz, entre otras. El valor agregado más cercano corresponde al rubro de vidrio y productos de vidrio (rama 43).

El consumo de energía final de la industria de fertilizantes del Balance se refiere a la producción de: urea, dimetil eter, malatión, paratión, amidotioato, caprolactama, sulfato de amonio, nitrato de amonio industrial, nitrato de amonio agrícola, formulas complejas N.P.K., acido sulfúrico, ácido nítrico, solución de nitrato, superfosfato simple de calcio, fosfatos de amonio, superfosfato triple, ácido fosfórico 54% y sulfato de amonio. El valor agregado en el SCN corresponde a la producción de fertilizantes (rama 36).

La cerveza y malta en el Balance se refiere al consumo de energía en su fabricación. El valor agregado en el SCN es el rubro de cerveza y malta (rama 21).

La industria de aguas envasadas considera el consumo de energía reportado por la Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas. El valor agregado más cercano en el SCN corresponde al rubro de Refrescos y Aguas (rama 22). Sin embargo, no se ha podido definir si el valor agregado de las aguas se refiere a aguas carbonatadas o a aguas purificadas.

La industria automotriz del Balance corresponde al consumo de energía empleado en la fabricación de vehículos automotores y considera también la producción de carrocerías y motores. El valor agregado más cercano considera los rubros de fabricación de vehículos automotores (rama 56), producción de carrocerías y remolques para vehículos automotores (rama 57, grupo 5701) y la manufactura de motores y sus partes (rama 57, grupo 5711) en el SCN.

La construcción del Balance reporta el consumo de energía empleado en esta industria exceptuando las que se utilizan en su flota de transporte. Los combustibles utilizados son el diesel y la electricidad. El valor agregado que corresponde a lo que considera el Balance es el rubro de construcción (Gran División 4).

El consumo de energía de la industria del hule se refiere al consumo principalmente en la fabricación de llantas y cámaras; y de otros productos de hule como mangueras industriales, partes automotrices, bandas transportadoras y de transmisión, empaques, suelas y tacones, y recubrimientos. El valor agregado más cercano a la actividad de esta industria reportada por el Balance se refiere a los rubros de fabricación de llantas y cámaras (rama 41, grupo 4101) y la manufactura de otros productos de hule (rama 41, grupo 4121) del SCN. Se excluye vulcanización de llantas y cámaras.

La industria del aluminio en el Balance considera el consumo en los distintos procesos de fabricación del aluminio. El valor agregado que corresponde a esta subrama del Balance es el rubro de metalurgia de aluminio y soldaduras (rama 47, grupo 4711).

La industria del tabaco en el Balance se refiere a la producción de cigarrros y puros. El valor agregado más cercano en el SCN corresponde a los rubros de fabricación de cigarrros (rama 23, grupo 2311) y de puros (rama 23, grupo 2312). Se excluye el beneficio de tabaco.

Finalmente, el consumo de energía de otras ramas en el Balance considera a todas las demás subramas del sector industrial como un residual de lo que PEMEX y CFE entregan al sector menos la energía empleada por las subramas consideradas como intensivas en el uso de la energía. El valor agregado más cercano a lo que refleja el BNE se obtiene también como residual del valor agregado industrial (industria manufacturera, minería y construcción) menos la sumatoria del valor agregado de las subramas consideradas en el Balance.

**Tabla 2.1 Cuadro resumen de la correspondencia del Balance Nacional de Energía con el Sistema de Cuentas Nacionales**

<b>Balance Nacional de Energía</b>	<b>Sistema de Cuentas Nacionales</b>
Siderúrgica	Industrias básicas de hierro y acero (rama 46)
Petroquímica PEMEX	Petroquímica secundaria de PEMEX (rama 34 aproximación)
Química	Química básica (rama 35); resinas sintéticas y fibras químicas (rama 37); productos farmacéuticos (rama 38); jabones, detergentes y cosméticos (rama 39), otros productos químicos (rama 40) y artículos de plástico (rama 41)
Azúcar	Azúcar (rama 14)
Cemento	Cemento hidráulico (rama 44)
Minería	Extracción y beneficio de carbón y grafito (rama 5), mineral de hierro (rama 7), minerales no ferrosos (rama 8), minerales no metálicos (rama 10), y explotación de canteras y extracción de arena y arcilla (rama 9)
Celulosa y papel	Papel y cartón (rama 31)
Vidrio	Vidrio y productos derivados del vidrio (rama 43)
Fertilizantes	Fertilizantes (rama 36)
Cerveza y malta	Cerveza y malta (rama 21)
Aguas envasadas	Refrescos y aguas carbonatadas (rama 22)
Automotriz	Vehículos automotores (excluye tractores) (rama 56), carrocerías y remolques para vehículos automotores (rama 57, grupo 5701), motores y sus partes (rama 57, grupo 5711)
Construcción	Construcción (Gran división 4)
Hule	Llantas y cámaras (rama 41, grupo 4101), y otros productos de hule (rama 41, grupo 4121)
Aluminio	Metalurgia del aluminio y soldaduras (rama 47, grupo 4711)
Tabaco	Cigarrros (rama 23, grupo 2311) y puros (rama 23, grupo 2312)
Otras ramas	Es el residual del total de la Industria Manufacturera menos la sumatoria de las ramas industriales consideradas (excepto minería y construcción)

Fuente: SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F. y INEGI, 1996, Sistema de Cuentas Nacionales de México, Cuentas de Bienes y Servicios 1988-1995, tomo 2, México, D.F.

De lo anterior se observan algunas desventajas de la manera en que se reporta el consumo de energía final del sector industrial en el BNE, como son: la estimación gruesa que se realiza en algunas industrias, como en la química; y la falta de medición y reporte de flujos de energía en el uso de biomasa (como el licor negro en la industria de la celulosa y papel), en el empleo de residuos y subproductos industriales (llantas, aceites usados, gases de alto horno en la industria siderúrgica, etc.) y en el consumo de los combustibles empleados en la cogeneración.

De esta forma y de acuerdo a la información proporcionada por el BNE, el sector industrial sólo puede analizarse a un nivel agregado por rama industrial. Para poder realizar estudios a un nivel más desagregado y proponer medidas de mejoramiento de eficiencia energética más específicas sería recomendable contar con información acerca del consumo de energía clasificados por usos finales o por procesos. Por usos finales, podría dividirse en iluminación, aire acondicionado, refrigeración, motores y controladores de velocidad, compresores, etc. Por procesos, de acuerdo a cada industria podrían separarse en calderas para la producción de vapor, de agua caliente y calefacción o en procesos específicos (en la industria siderúrgica podrían separarse en altos hornos, reactores de reducción directa, convertidores básicos de oxígeno, hornos de arco eléctrico, rolado en caliente y rolado en frío). Esto permitiría calcular el consumo específico de energía de las tecnologías en uso.

Existen estudios realizados por CONAE en donde se analizó el consumo de energía por usos finales para la industria alimenticia, la industria química y la industria del papel.<sup>57</sup>

## 2.3 Tendencias históricas del consumo de energía y de las emisiones de bióxido de carbono del sector industrial mexicano

En 1995 el consumo final del sector industrial representó el 35.2% del consumo nacional;<sup>58</sup> aportó el 23.9% del valor agregado nacional<sup>59</sup> y generó el 35.1% de las emisiones de carbono nacionales.<sup>60</sup>

Entre 1970 y 1995, el consumo final del sector industrial aumentó de 475.2 a 1255.5 PJ con una tasa anual de 4 % en este periodo; de manera similar, la actividad de este sector creció a un ritmo anual del 3.3% y las emisiones de carbono se han incrementado de 10 a 31 millones de toneladas de carbono con una tasa de crecimiento anual del 4.6%.

<sup>57</sup> CONAE, 1995, *Perfiles energéticos de la industria química y alimenticia*, México, D.F.

<sup>58</sup> SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, p. 57-58

<sup>59</sup> INEGI, 1997, *Sistema de Cuentas Nacionales de México, Cuentas de Bienes y Servicios 1988-1995*, Tomo II, México, p.

81

<sup>60</sup> <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/nation96.ems>, *National CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil-fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1996*. De acuerdo a esta fuente, las emisiones de carbono nacionales en 1995 fueron de 88.19 millones de toneladas de carbono.

A continuación se describe la evolución de los principales indicadores de eficiencia energética entre 1970 y 1995 y posteriormente se emplea la metodología del análisis de descomposición para explicar la manera en que estos indicadores influyeron en las variaciones del consumo de energía primaria, en la intensidad energética y en la intensidad de las emisiones de carbono del sector industrial en el periodo analizado.

### **2.3.1 Demanda de energía del sector industrial: actividad, estructura e intensidad energética**

En la gráfica 2.2 se muestran los factores mencionados indexados a 1970, en donde el nivel de actividad se mide a través del valor agregado sectorial<sup>61</sup>, la estructura se especifica como la participación del valor agregado del sector industrial en el valor agregado nacional y la intensidad energética se calculó dividiendo el consumo energético del sector industrial entre el valor agregado del mismo.

Como se observa en esta gráfica, el consumo energético del sector industrial aumentó notablemente de 1970 a 1995, debido principalmente a un fuerte crecimiento en la actividad industrial (a pesar de que la participación del valor agregado del sector industrial en el valor agregado nacional disminuyó de un 26.3% a un 23.9%), mientras que la intensidad energética se incrementó de 8.9 a 11.0 MJ/dólar de 1990.<sup>62</sup>

De 1970 a 1995, el nivel de actividad industrial se incrementó rápidamente de 1970 a 1981 con un ritmo anual del 6.6%, posteriormente la actividad se redujo drásticamente de 1981 a 1983, aumentó ligeramente hasta 1985, recuperó su tendencia creciente de 1986 a 1994 pero a un ritmo del 3.3%, finalmente decreció en 1995.

De 1970 a 1977, el nivel de actividad industrial creció paulatinamente gracias a la presencia de inversión, principalmente en actividades dedicadas a la exploración y producción de petróleo. A partir de 1978, el auge petrolero comienza y esta actividad se convierte en el eje de la economía nacional hasta 1981. Durante este periodo, el PIB industrial se incrementa aceleradamente, y algunas industrias entre ellas, la construcción y la siderúrgica, alcanzan las tasas de crecimiento más altas. Al igual que en la década anterior, el gobierno mexicano siguió favoreciendo el crecimiento de varias ramas industriales a través de subsidios, incentivos financieros, impuestos proteccionistas; así como el otorgamiento de precios preferenciales de

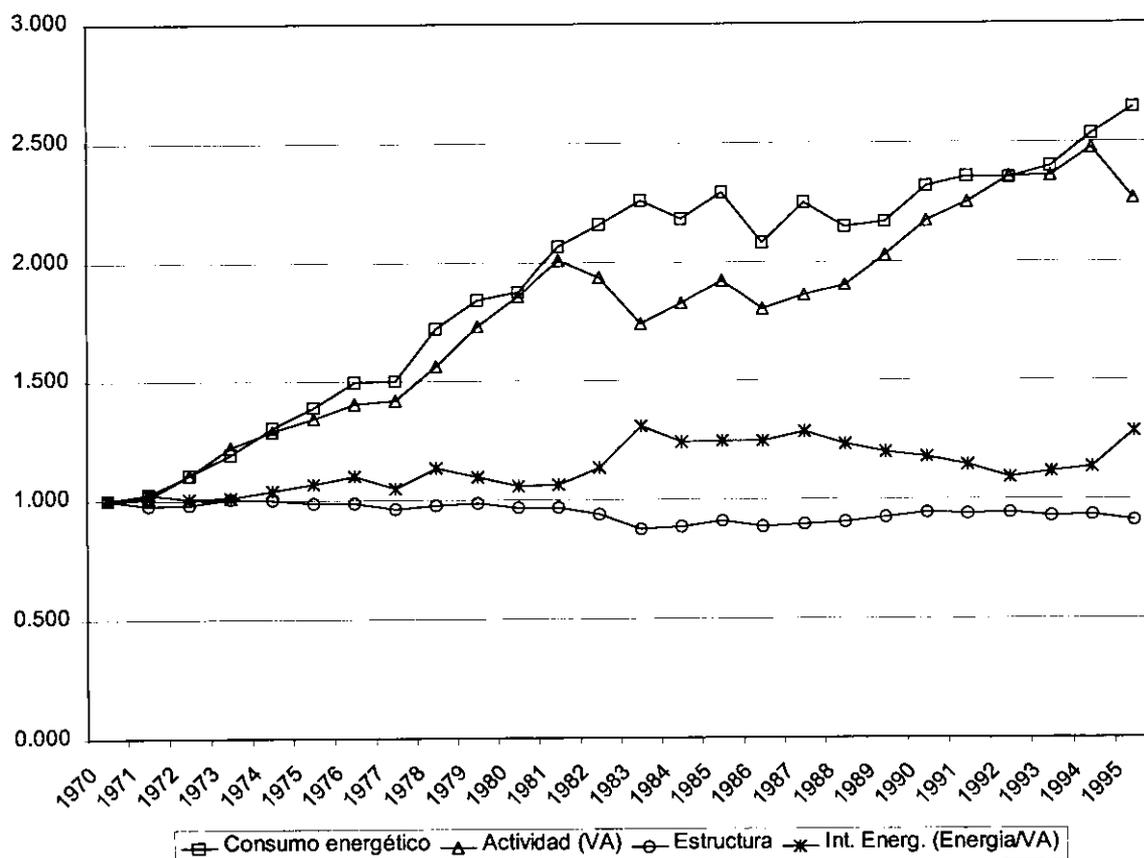
---

<sup>61</sup> A partir de 1995, el SCN no sólo modificó el año base de 1980 a 1993, también la estructura de ponderación de los cálculos a precios "reales", es decir, la metodología para estimar los índices de precios implícitos del PIB. El objetivo en este capítulo es analizar la evolución del consumo energético a partir de las variaciones en ciertos factores, por lo tanto, lo importante es observar las tendencias de los indicadores económicos propuestos. Para ello, se tomó como base el valor agregado base 1993 de 1988 a 1995, y el valor agregado de 1970 a 1987 fue estimado a partir del porcentaje de variación anual de los datos base 1980.

<sup>62</sup> Convertido a dólares estadounidenses de 1990 a través del poder de paridad de compra.

hidrocarburos y de electricidad para ciertas ramas industriales.<sup>63</sup> Es importante mencionar que durante este periodo varias industrias como la siderúrgica, la azucarera, la de fertilizantes, la minería, entre otras, se encontraban organizadas y administradas por el Estado, el cuál realizó inversiones importantes para la expansión de estas industrias y satisfacer la creciente demanda interna adquiriendo fuertes deudas en el extranjero.

A partir de 1981, se presentó una fuerte crisis económica en el país debido a la caída de los precios internacionales del petróleo. En el periodo anterior, motivadas por un crecimiento económico sostenido muchas industrias aumentaron su capacidad instalada y con ello la oferta de sus productos, sin embargo, esta crisis económica rompió el equilibrio entre la oferta y la demanda, lo que provocó una disminución significativa en la actividad industrial, principalmente entre 1982 y 1983.



Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, Balance Nacional de Energía, México, D.F., INEGI, 1996, Sistema de Cuentas Nacionales, Aguascalientes, México.

**Gráfica 2.2 Indicadores de cambio del sector industrial mexicano en el periodo 1970 – 1995: consumo energético, actividad, estructura e intensidad energética (Índice 1970=1)**

<sup>63</sup> Rueda, I., 1994, *Tras las huellas de la privatización: El caso de Altos Hornos de México*, Siglo Veintiuno Editores, primera edición, p. 44-49.

Como medidas macroeconómicas para liquidar la deuda externa adquirida y disminuir la inflación, el gobierno mexicano favoreció el incremento de las exportaciones, y redujo la inversión y el gasto público, lo que provocó un decaimiento en el mercado interno. Ante esta situación, algunas industrias, como la del cemento, elevaron fuertemente sus exportaciones aprovechando su capacidad instalada construida en la década anterior y sus relativos bajos costos de producción respecto a otros mercados externos.

Por otro lado, bajo una política neoliberal, en 1983 comenzó la apertura comercial y la privatización de industrias paraestatales, entre ellas, la siderúrgica, la de fertilizantes, la minería y la azucarera; las cuáles fueron vendidas a precios sumamente bajos y en condiciones muy atractivas.<sup>64</sup> Entre 1983 y 1985, la producción industrial se recuperó ligeramente, descendió en 1986 y se mantuvo en un bajo nivel hasta 1988.

De 1989 a 1993, la economía nacional se recuperó notablemente debido a la entrada de inversiones extranjeras y a una disminución de la deuda pública interna y externa.<sup>65</sup> Así, la producción industrial aumentó favorecida por las exportaciones y por un mercado interno reactivado; mientras que la energía del sector industrial fue consumida de manera más eficiente debido a la modernización tecnológica en algunas ramas industriales, tales como la industria siderúrgica, la industria azucarera y la industria del cemento, entre otras.

Finalmente la devaluación de la moneda mexicana a finales de 1994, provocó una crisis económica que afectó nuevamente el mercado interno y redujo la producción industrial. Sin embargo, algunas industrias mantuvieron su producción gracias a su capacidad de exportación, beneficiadas por el tipo de cambio y la debilidad del peso frente a otras monedas. De 1995 a 1997, la actividad del sector industrial continúa incrementándose.

Otra variable importante en el análisis del consumo de energía del sector industrial es la estructura de las diferentes ramas industriales, es decir, la participación del valor agregado de cada rama industrial en el valor agregado total del sector. En la gráfica 2.3 se muestra la estructura de las diferentes ramas, así como su variación entre 1970 y 1995. Las ramas que tuvieron una mayor participación en el valor agregado industrial en 1995 son: la construcción (10.2%), la industria química (10.2%), la automotriz (3.6%), la siderúrgica (3.3%), la minería (2.8%), la de celulosa y papel (1.5%), la de aguas envasadas (1.3%), la de cerveza y malta (1.2%) y la del vidrio (1.1%); mientras que las demás industrias tienen una estructura menor al 1%.

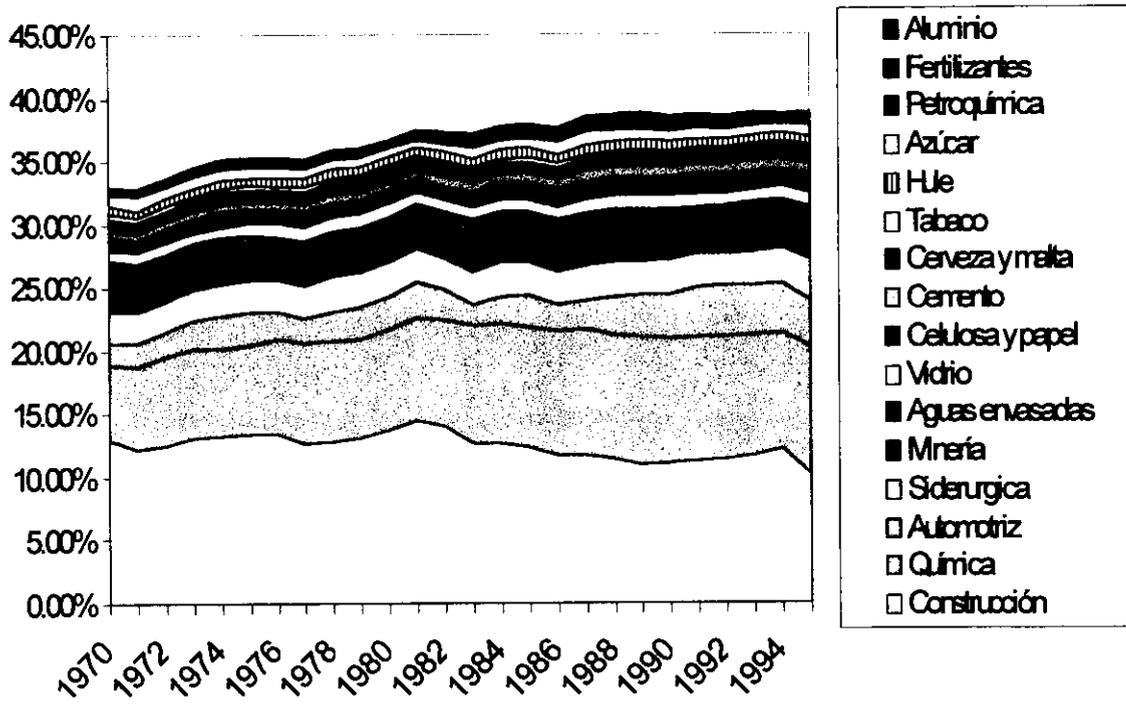
Además en esta gráfica se puede observar que la participación de las ramas industriales consideradas en el valor agregado del sector industrial se modificó de diferente manera entre 1970 y 1995: algunas ramas aumentaron ligeramente su estructura como la industria de aguas

---

<sup>64</sup> Rueda, I., 1994, *Op. cit.*, p. 53

envasadas (13.5%) y la del hule (20%); la estructura de otras industrias se incrementó en mayor medida como la industria del vidrio (30.4%), la industria siderúrgica (32.4%), la industria de fertilizantes (39.6%), la de cerveza y malta (40.4%), la de celulosa y papel (41.6%), la del cemento (55.9%) y la industria química (67.5%); mientras que la estructura de la industria automotriz y la de petroquímica PEMEX crecieron significativamente en un 108.4% y un 362% respectivamente. Por otro lado, la participación de otras industrias disminuyó, entre ellas, la minería (1.6%), la industria del aluminio (7.1%), la azucarera (9.4%), la construcción (20.4%) y el tabaco (45.8%). Finalmente la participación de las "otras ramas" del sector industrial también se redujo en un 8.8%.

En principio, el notable aumento de la estructura de ciertas ramas industriales provocaría un incremento proporcional en el consumo energético industrial. Sin embargo, es importante considerar la forma en que las diversas ramas industriales consumen energía para fabricar sus productos y su variación en el tiempo.



Fuente: INEGI, varios años, Sistema de Cuentas Nacionales, México.

**Gráfica 2.3 Estructura de las ramas más intensivas en el uso de la energía del sector industrial entre 1970 y 1995**

<sup>65</sup> Rueda, I., 1994, *Op. cit.*, p. 57

Otro factor importante es la intensidad energética de cada rama industrial. Como se observa en la tabla 2.2, las industrias más intensivas en el uso de la energía por unidad de valor agregado son: la Petroquímica PEMEX, el cemento, el azúcar, la siderúrgica, la minería, la de fertilizantes, la del vidrio, la del aluminio y la de la celulosa y el papel; mientras que la industria química, la de cerveza y malta, la construcción, la de aguas envasadas, la automotriz, la del hule y la del tabaco son poco intensivas. Es importante observar que las primeras han disminuido su intensidad en el periodo analizado.

**Tabla 2.2 Intensidades energética primarias en unidades económicas para 1995 de las ramas industriales más intensivas en el uso de la energía y su variación de 1970 a 1995**

	Intensidad energética en 1995 [MJ/U.S. dólar 1990]	Variación 1970-1995 [%]
Siderúrgica	53.61	-23.2%
Petroquímica PEMEX	175.23	-46.2%
Química	10.08	-12.8%
Azúcar	82.49	-19.8%
Cemento	87.40	-25.5%
Minería	22.81	-27.6%
Celulosa y Papel	25.97	-11.4%
Vidrio	20.09	-41.3%
Fertilizantes	30.32	14.3%
Cerveza y Malta	7.42	-5.2%
Aguas envasadas	5.93	39.3%
Automotriz	2.06	-76.8%
Construcción	0.48	137.8%
Hule	6.57	-9.3%
Aluminio	19.34	-51.2%
Tabaco	1.85	10.2%
Otras ramas	6.33	84.6%

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, varios años, *Sistema de Cuentas Nacionales*; SE, 1997; *Balace Nacional de Energía 1996*, México, D.F.

### 2.3.2 Análisis de descomposición

Entre 1970 y 1995, el consumo de energía primaria en el sector industrial aumentó en un 181.7% (1121.8 PJ). A continuación se analiza el efecto de los cambios en la actividad, estructura e intensidad energética que influyeron en el incremento de este consumo a través de los índices de promedio simple AVE-PDM2 empleando la técnica aditiva del consumo de energía rotando el año base, los cuáles se muestran en la tabla 2.3. En la aplicación de esta metodología para el sector industrial se consideró el valor agregado total del sector industrial como parámetro de actividad y las estructuras e intensidades energéticas de cada rama industrial.

De acuerdo a las recomendaciones de Ang y Farla,<sup>66</sup> se emplearon los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base, ya que el residuo obtenido resultó ser el menor respecto a otros índices. Es importante recordar que el efecto de actividad muestra la manera en

<sup>66</sup> Ang, 1995, *Op. cit.*, p. 1092 y Farla, 1997, *Op. cit.*, p. 746

que se incrementa el consumo de energía considerando que tanto la estructura como la intensidad energética se mantienen constantes de un año para otro; la misma consideración se emplea tanto para el efecto de la estructura como para el efecto de la intensidad energética donde los otros factores se mantienen constantes entre un año y otro. Sin embargo, empleando estos índices consideran también, aunque de manera ponderada, los efectos combinados de estas variables.

**Tabla 2.3 Cambios en los efectos de actividad, estructura e intensidad energética que influyeron en el consumo de energía primaria del sector industrial 1970-1995**

	Cambios (PJ)
Consumo de energía primaria 1970-1995	1121.8
Efecto de actividad	834.1
Efecto de estructura	374.1
Efecto de intensidad energética	-83.2
Efecto de residuales	-3.2

Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F. e INEGI, 1996, Sistema de Cuentas Nacionales, Aguascalientes, México

La tabla 2.3 muestra que el efecto dominante sobre el consumo de energía del sector industrial durante este periodo es el nivel de actividad. Por otro lado, la manera en que las distintas ramas industriales participaron en el valor agregado industrial también influyó en el aumento del consumo en este sector. De acuerdo a lo observado en el inciso anterior y a las consideraciones mencionadas; este aumento se debió a que, en general, las industrias más intensivas en el uso de la energía incrementaron su participación en el valor agregado del sector. Finalmente, los resultados sugieren que la eficiencia energética medida a través de la intensidad contribuyó de manera poco significativa en la reducción del consumo de energía en este sector.

Por otro lado, se observa que el efecto de la actividad es considerablemente mayor que los efectos de la estructura y de la intensidad energética debido a un crecimiento acelerado del valor agregado y a un periodo de análisis largo. Para poder examinar con mayor detalle el efecto de la estructura y la intensidad energética se utilizó también la técnica aditiva de la intensidad energética descrita por las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12. En este caso, se analizó la variación de la intensidad energética del sector industrial estimando los efectos debidos a los cambios en la estructura y en la intensidad a través de los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base debido a su pequeño residuo, los cuáles se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Cambios en los efectos de estructura y eficiencia energética que influyeron en la intensidad energética primaria del sector industrial 1970-1995**

	Cambios (MJ/dólar 1990)
Intensidad energética 1970-1995	2.17
Efecto de estructura	2.96
Efecto de intensidad energética	-0.79
Efecto de residuales	0.00

Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F. e INEGI, 1996, Sistema de Cuentas Nacionales, Aguascalientes, México

Los resultados de este ejercicio, muestran que el factor que influyó en el aumento de la intensidad energética (28.4%) fue el estructural. Esto se debe a que la rama industrial más intensiva en el uso de la energía, la petroquímica, aumentó considerablemente su estructura. Otras ramas también intensivas, como la industria del cemento, la siderúrgica, la de celulosa y papel y la química entre otras, incrementaron su participación en menor medida. Sin embargo, el aumento en la estructura de algunas industrias puede deberse a una mayor fabricación de productos con un mayor valor agregado; por ejemplo, la producción de automóviles que al añadirles componentes de lujo, de eficiencia de combustible o de reducción de contaminantes incrementan notablemente su valor agregado, aunque en estos casos no aumenta de manera significativa el consumo energético por unidad producida.

Por otra parte, si la estructura se hubiera mantenido constante en el nivel de 1970, la intensidad energética se hubiera reducido. Esto se debe a que la mayoría de las ramas industriales disminuyeron su intensidad energética, lo cuál puede corresponder a mejoras en la eficiencia energética. Algunas ramas industriales muy intensivas, como la petroquímica, la del aluminio, la del vidrio y la del cemento redujeron su intensidad energética. La fuerte disminución y el aumento de la intensidad en la industria automotriz y en la construcción respectivamente no afectaron este efecto ya que sus intensidades energéticas son poco significativas; aunque el efecto combinado de la estructura con la intensidad para estas ramas es importante.

En el efecto de intensidad también se tomó en cuenta la eficiencia energética de la generación de electricidad, la cuál ha disminuido de 1970 a 1995. Durante la década de los setentas, la electricidad se produjo principalmente en hidroeléctricas y, en menor medida, en termoeléctricas. En años siguientes, la capacidad instalada de las plantas termoeléctricas aumentó considerablemente, las cuáles empleaban principalmente combustóleo. La eficiencia de una planta termoeléctrica convencional de mediana capacidad instalada es de 29.4%.<sup>67</sup> Sin embargo, en los últimos años se han construido y operado varias plantas de ciclo combinado que utilizan gas natural, las cuáles tienen una mayor eficiencia energética (46.8%)<sup>68</sup> y una menor emisión de contaminantes. Durante esta época, la participación de los diferentes tipos de plantas generadoras de electricidad como las hidroeléctricas, las geotérmicas y las nucleares se ha modificado; sin embargo, esta variación influye en mayor medida en las emisiones de carbono como se examina en el siguiente inciso.

---

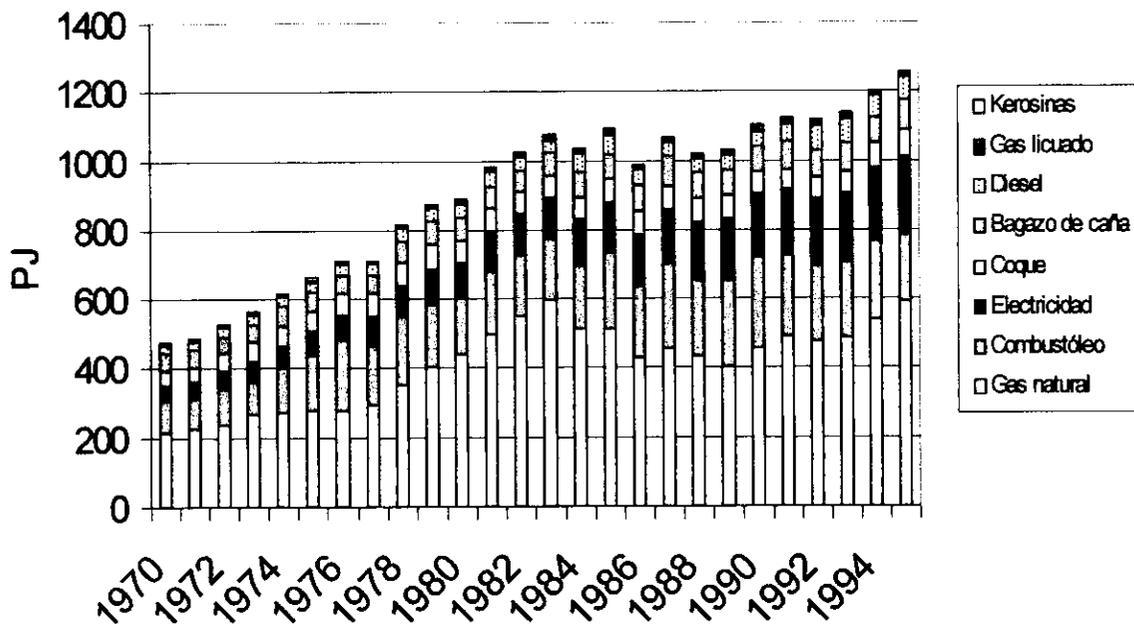
<sup>67</sup> CFE, 1995, COPAR 1994, México, D.F., p. 1.8

<sup>68</sup> CFE, 1995, *Op. cit.*, p. 1.8

### 2.3.3 Análisis de las emisiones de carbono

En 1995, las emisiones de carbono del sector industrial debidas al uso de combustibles fósiles y bagazo de caña fueron de 30.3 millones de toneladas de carbono,<sup>69</sup> y la intensidad de las emisiones por dólar de 1990 producido fue de 192 g de C/dólar de 1990. Entre 1970 y 1995, estas emisiones crecieron un 203.4% con una tasa anual de 4.5%, en tanto que la intensidad de las emisiones de carbono se incrementó en un 34.1% (48.8 g de C/dólar de 1990).

Para el análisis de las emisiones de carbono es importante la mezcla de combustibles de este sector y sus variaciones. Los combustibles empleados en 1995 en el sector industrial fueron: el gas natural (47.2%), la electricidad (17.9%), el combustóleo (15.2%), el bagazo de caña (6.7%), el coque (6.4%), el diesel (5.1%), el gas licuado (1.4%) y la querosina (0.1%). En la gráfica 2.3 se muestra la variación de la mezcla de combustibles en este sector, la participación del gas natural se modificó ligeramente aumentando de 45.5% en 1970 a 47.2% en 1995; mientras que la del combustóleo disminuyó de 19.1% en 1970 a 15.2% en 1995. Se observó que el combustóleo y el gas natural son generalmente sustitutos ya sea por precios o por restricciones ambientales. Por otro lado, la electricidad ha incrementado significativamente su participación de 8.9% en 1970 a 17.9% en 1995. Finalmente, la participación del coque, del bagazo de caña y de la querosina ha disminuido.



Fuente: SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F.

**Gráfica 2.2 Consumo de energía por combustibles del sector industrial mexicano**

<sup>69</sup> Cálculos realizados con información del Balance Nacional de Energía 1996 (SE, 1997, *Op. cit.*, p. 73) y el Cuaderno de Trabajo del Inventario de gases de efecto invernadero (IPCC, 1997, *Op. cit.*, p. 1.6)

Como se mencionó anteriormente la intensidad de las emisiones de carbono aumentó un 34.1% (48.8 g de C/dólar de 1990). Para analizar los factores que influyeron en esta incremento se empleó la técnica aditiva de intensidad de emisiones descritas por las ecuaciones 1.19, 1.20, 1.21 y 1.22 tomando en cuenta los cambios debidos a los efectos de la estructura, de la intensidad energética y de los factores de emisión. En este caso, se estimaron también los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base con los cuáles se obtuvo el menor residuo los cuáles se muestran en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Cambios en los efectos de estructura, intensidad energética, mezcla de combustibles que influyeron en la intensidad de las emisiones de carbono del sector industrial 1970-1995**

	Cambios (g de C/dólar 1990)
Intensidad de las emisiones 1970-1995	48.84
Efecto de estructura	47.20
Efecto de intensidad energética	-29.16
Efecto de los factores de emisión	30.87
Efecto de residuales	-0.07

Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F.; INEGI, varios años, Sistema de Cuentas Nacionales, Aguascalientes, México e IPCC, 1996, IPCC Greenhouse Gas Inventory Workbook, EUA.

A través del efecto estructura se observa que el incremento en la participación de ramas industriales como la petroquímica, la química, la del cemento, la de celulosa y papel y la del vidrio que emplean principalmente combustóleo y gas natural contribuyó al aumento en la intensidad de emisiones de carbono. El efecto intensidad muestra que el mejoramiento de la eficiencia energética en algunas ramas industriales influye en la mitigación de la intensidad de emisiones.

Finalmente, en el efecto de los factores de emisión se incluyen los efectos debidos a la sustitución de combustibles tanto en el sector industrial como en la generación de electricidad. El efecto de la sustitución de combustibles por otros más limpios contribuyó a la disminución de la intensidad de emisiones en ciertas industrias; como en la siderúrgica, en la del cemento y en la del vidrio donde el gas natural reemplazó parcialmente al combustóleo. Sin embargo, en un nivel más agregado, esta sustitución no benefició a la reducción de la intensidad de emisiones. Esto se puede deber a un notable crecimiento en el empleo de la electricidad en casi todas las ramas industriales, cuyo factor de emisión también ha aumentado en el periodo analizado. Este incremento en el factor de emisión de la electricidad se debió principalmente a que en 1970, la capacidad instalada de generación estaba constituida en un 53% por plantas hidroeléctricas que no emiten bióxido de carbono a la atmósfera y en un 39% por plantas termoeléctricas de vapor que empleaban principalmente combustóleo. Entre 1970 y 1980, la capacidad instalada de las termoeléctricas de vapor creció más rápidamente que las hidroeléctricas y también se construyeron termoeléctricas que emplean gas natural. Entre 1980 y 1990, la capacidad de las termoeléctricas

de vapor siguió aumentando y se construyeron plantas de ciclo combinado y una carboeléctrica. En 1989, empezó a operar Laguna Verde. Finalmente en 1995, la capacidad instalada de plantas que emplean energías renovables para la producción de electricidad como las hidroeléctricas, geotérmicas y eólicas sólo constituyeron un 31% de la capacidad nacional, la nuclear representó un 4%; mientras que el 65% restante son termoeléctricas que emplean combustibles fósiles. El mayor empleo de estos combustibles en la generación de electricidad provocó un aumento en la intensidad de las emisiones de carbono. Aunque la sustitución del combustóleo por gas natural en las plantas termoeléctricas y el incremento en la construcción y en generación de plantas de ciclo combinado contribuyeron a que este efecto no fuera mayor.

Actualmente el gas natural aumenta su participación en la mezcla de combustibles tanto en el sector industrial como en la generación de electricidad favorecido por la normatividad ecológica (NOM-085-1994 y NOM-186-1994) que regulan las emisiones máximas permisibles de ciertos contaminantes y las especificaciones que deben tener los combustibles empleados.<sup>70</sup>

En los siguientes capítulos se describirá con mayor detalle el análisis de estas variables para la industria siderúrgica y la del cemento.

## 2.4 Conclusiones

De acuerdo con la metodología del análisis de descomposición, se encontró que el principal factor que contribuyó al incremento del consumo de energía y de las emisiones de carbono fue la actividad, ya que la producción creció aceleradamente durante este periodo. Por otro lado, al analizar la intensidad energética, mediante la metodología planteada, se encontró que a pesar de que los cambios en la estructura de las diferentes ramas industriales favorecieron el aumento de la intensidad energética durante estos años, este efecto se contrarrestó con las mejoras en la eficiencia energética de varias ramas.

Un análisis similar al de la intensidad energética se empleó para examinar la variación de la intensidad de las emisiones de carbono, en la cuál se encontró que los principales factores que contribuyeron a su incremento fueron las variaciones en la estructura de las diferentes ramas y la sustitución de combustibles tanto en el sector industrial como en la generación de electricidad. De manera análoga al análisis de la intensidad energética, las mejoras en la eficiencia compensaron el efecto de los factores antes mencionados. Es importante mencionar que a pesar de que en algunas ramas industriales, el combustóleo fue reemplazado por el gas natural; esto no contribuyó de manera significativa en una disminución de la intensidad de emisiones del sector. Por otro lado, la participación de la electricidad en la mezcla de combustibles de casi todas las ramas industriales aumentó notablemente de 1970 a 1995, asimismo el FEC de la electricidad se incrementó.

---

<sup>70</sup> SE, 1997b, Prospectiva del Mercado de Gas Natural 1997-2006, México, D.F., p.24-25

Finalmente, se observaron algunas desventajas de la manera en que el Balance Nacional de Energía reporta el consumo de energía final del sector industrial. Para poder realizar estudios a un nivel más desagregado y proponer medidas de mejoramiento de eficiencia energética más específicas sería recomendable contar con información acerca del consumo de energía clasificados por usos finales o por procesos. Por usos finales, podría dividirse en iluminación, aire acondicionado, refrigeración, motores y controladores de velocidad, compresores, etc. Por procesos, de acuerdo a cada industria podrían separarse en calderas para la producción de vapor, de agua caliente y calefacción o en procesos específicos. Esto permitiría calcular el consumo específico de energía de las tecnologías en uso.

## Capítulo 3

### Industria siderúrgica

Este capítulo se divide en seis partes. En la primera, se describe el proceso de fabricación, el consumo específico de energía (CEE) de la mejor práctica y algunas medidas de eficiencia energética para cada etapa. En la segunda parte, se resume la historia de la industria siderúrgica mexicana desde su comienzo en 1903 hasta su situación actual. En la siguiente parte, se explica la evolución de los diferentes procesos en la fabricación de hierro y acero en la industria siderúrgica mexicana, así como los cambios en el consumo de energía que se presentaron entre 1970 a 1995. A continuación se describen los factores que contribuyeron en la disminución del CEE y la reducción de las emisiones específicas de carbono de esta industria, utilizando las metodologías del análisis de descomposición del CEE y de las emisiones específicas de carbono; así como la metodología de eficiencia-estructura. Asimismo se estima el potencial técnico de eficiencia energética de la industria siderúrgica mexicana para 1995. En la quinta sección se realiza una comparación internacional de los indicadores de la industria siderúrgica mexicana con las de Japón, Alemania, Francia, Estados Unidos y Brasil. Finalmente, se recomiendan medidas de ahorro de energía basadas en el potencial técnico calculado.

El acero es un material importante en la vida cotidiana y en el desarrollo de un país, se emplea para fabricar desde latas, envases metálicos, partes de estufas, lavadoras, herramientas, automóviles, motores, postes hasta para la construcción de edificios, puentes, tanques, vagones de ferrocarril, tubos para extraer y transportar gas, etc. Finalmente al término de su vida útil, el acero puede ser reciclado, en forma de chatarra, para fabricar nuevos productos.

Para la fabricación de este material se requieren grandes cantidades de energía, mineral de hierro y recursos naturales. En México, la industria siderúrgica es la más intensiva en el uso de la energía, en 1995 consumió el 17.2% del consumo final del sector industrial.

Entre 1970 y 1995, la producción de acero creció a una tasa anual del 4.7%, mientras el Consumo Específico de Energía primario (CEE<sub>p</sub>) disminuyó de 31.3 a 23.2 GJ/ton de acero crudo.

### 3.1 Descripción del proceso de fabricación

El acero se fabrica principalmente en plantas integradas y semiintegradas como acero primario o acero secundario. El acero primario se obtiene a partir del arrabio<sup>71</sup> en los altos hornos (AH), el cuál se introduce en el horno de hogar abierto (HHA) o en el convertidor básico de oxígeno (CBO) presentándose las rutas: AH-HHA y AH-CBO. El acero secundario se fabrica a partir de la chatarra o del hierro esponja,<sup>72</sup> también conocido como hierro de reducción directa (HRD), los cuáles se introducen en el horno eléctrico de arco (HEA) tanto en plantas integradas (HRD-HEA) como en plantas semiintegradas (chatarra-HEA). Es importante mencionar que en varios países se utiliza el HRD o el carburo de hierro como una alternativa de alta calidad para la chatarra debido a su bajo contenido de carbono.

El proceso de fabricación del acero consta de dos etapas: la producción del arrabio o del HRD y la manufactura del acero.

Durante la primera etapa se tienen los subprocesos de: la producción de coque a partir de carbón metalúrgico, la preparación del mineral de hierro y la reducción de este mineral para obtener arrabio en los altos hornos y HRD en reactores de reducción directa (HYLIII, Midrex), en lecho fluidizado (Fior, Circofer, Carburo de hierro), en horno rotatorios (SL/RN, DRC) o en hogares rotatorios (Fastmet, Inmetco).

En la segunda etapa, el arrabio se emplea como materia prima en los HHA, también conocidos como Siemens-Martin o en los CBO; mientras que el HRD y/o la chatarra se introducen en el HEA en los cuáles se obtiene el acero líquido.

Los siguientes pasos tienen como objetivo transformar el acero líquido en productos siderúrgicos semiacabados. Tradicionalmente el acero líquido es colado en lingotes y posteriormente éstos son rodados para obtener laminados planos y no planos. Actualmente con la técnica del colado continuo, el acero líquido es colado y directamente se elaboran laminados planos y no planos, ahorrando una gran cantidad de energía y disminuyendo las pérdidas de material. Después el material colado es recalentado e introducido en pesadas secciones de rodillos donde se producen planchas, perfiles, barras, tubos sin costura, etc.; a esta etapa se le conoce como rodado o laminado en caliente. Para obtener laminados planos de menor espesor, se introducen a otro proceso conocido como rodado o laminado en frío.

A continuación se describen las características más importantes de cada etapa del proceso.

---

<sup>71</sup> Arrabio se le conoce al metal caliente producido principalmente en el alto horno, o en el proceso de fusión directa (Corex)  
<sup>72</sup> El hierro de reducción directa es producto de la reducción del mineral de hierro en su estado sólido a temperaturas menores de 1000°C que se lleva a cabo en procesos como el HYL o el Mildrex.

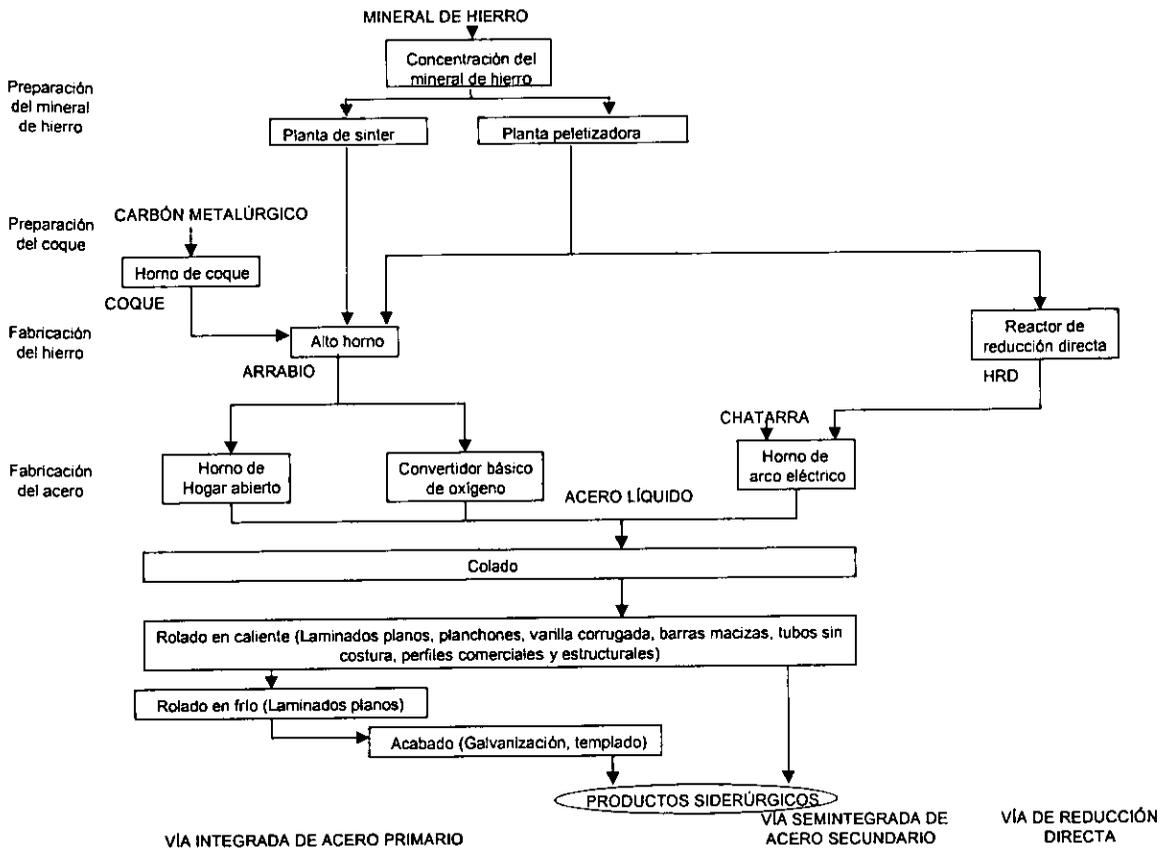


Figura 3.1 Representación esquemática del proceso de fabricación del acero.

### 3.1.1 Preparación del mineral de hierro

A partir de la extracción de las rocas que contienen el mineral de hierro, su preparación consiste en la trituración y molienda, para la reducción del tamaño; la flotación, para separar el mineral de la ganga<sup>73</sup>; la sinterización y la peletización, para concentrar el material que se introduce en el AH o en los reactores de reducción directa.

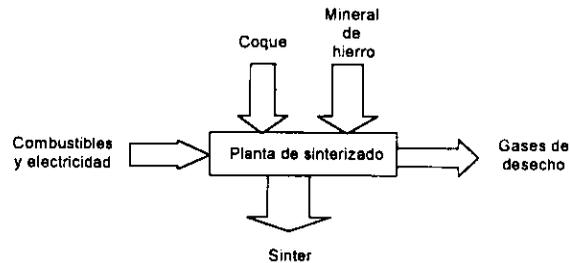
#### 3.1.1.1 Sinterización

El proceso de sinterización consiste en calentar el mineral de hierro mezclado con carbón o con coque a una temperatura de 1300 a 1400 °C para producir una masa semifundida que al solidificarse forma piezas porosas de sinter con las características de tamaño y dureza requeridas en el AH.

<sup>73</sup> Ganga es la parte de la roca extraída que no tiene valor.

En esta etapa, la mezcla del mineral de hierro con coque llega a la planta de sinterización, se coloca en parrillas móviles y es calentada con quemadores de gas. La temperatura y el aire que circula entre las parrillas provocan que el coque de la superficie se comience a quemar; en el momento en que el coque cercano a la base de la parrilla se enciende, el sinter es descargado. Y una vez que se solidifica se fragmenta en una trituradora y se enfría con aire, el cuál puede ser recuperado y utilizado como combustible gaseoso.<sup>74</sup>

El CEE de esta etapa en una planta integrada considerada como la "mejor práctica" es de 1.23 GJ<sub>comb</sub> y de 0.21 GJ<sub>e</sub> por tonelada de acero crudo. Esta planta recupera los gases de desecho y los emplea para calentar el aire de combustión y para producir vapor en una caldera de calor de desecho.<sup>75</sup>

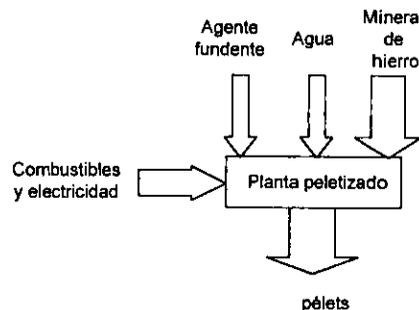


**Figura 3. 2 Flujo de materiales y energía en la planta de sinterizado**

### 3.1.1.2 Peletización

El proceso de peletización consiste en pulverizar el mineral de hierro y mezclarlo con agua y un material fundente; se seca y se calienta en parrillas móviles o en un horno a 1300 °C.<sup>76</sup>

El CEE de la "mejor práctica" para una planta integrada es de 0.46 GJ<sub>comb</sub>/ton de acero crudo y 0.1 GJ<sub>e</sub>/ton de acero crudo.<sup>77</sup>



**Figura 3. 3 Flujo de materiales y energía en la planta de peletizado**

<sup>74</sup> IISI y UNEP, 1997, *Steel Industry and the Environment, Technical and Management Issues*, Brichaut, F. (editor), Bélgica, p. 14.

<sup>75</sup> Worrell, E., 1996, *Op. cit.*, p. 51-65.

<sup>76</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 15.

<sup>77</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 54.

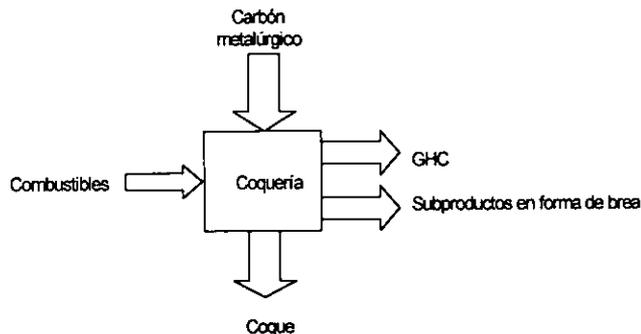
### 3.1.2 Preparación del coque

La función principal del coque dentro del alto horno es reducir el mineral de hierro en metal, aunque también es empleado como combustible y como soporte físico que permite el libre flujo de gas en el alto horno.

El coque se produce a partir del carbón metalúrgico que es calentado en baterías de coque de 15 a 21 horas a una temperatura de 1300°C en una atmósfera libre de oxígeno. Posteriormente el coque caliente es transportado a una torre donde se rocía con agua para disminuir rápidamente su temperatura a 200°C.<sup>78</sup>

Un subproducto importante que se genera durante el proceso de calentamiento del carbón es el gas del horno de coque (GHC) que puede ser empleado como un combustible gaseoso en otras etapas. Su poder calorífico es de aproximadamente 17.6 MJ/m<sup>3</sup>.<sup>79</sup>

La planta considerada como la "mejor práctica" emplea 0.42 toneladas de coque por tonelada de acero crudo y el CEE en esta etapa es de 1.62 GJ<sub>comb</sub>/ton de acero crudo y 0.06 GJ<sub>e</sub>/ton de acero crudo.<sup>80</sup>



**Figura 3. 4 Flujo de materiales y energía en el proceso de coquización**

Algunas medidas de ahorro de energía en esta etapa son: el control computarizado de la combustión de las baterías de coque, la regulación de velocidad de los colectores de polvo<sup>81</sup> y el apagado en seco del coque. Este último consiste en circular un gas inerte (nitrógeno) a través del coque caliente, lo cual que permite recuperar el calor sensible del coque y emplearlo en la producción de vapor para la planta o en la generación de electricidad.

<sup>78</sup> IISI y UNEP, *Op. cit.*, p. 16.

<sup>79</sup> Elizalde, A., et. al., 1998, "Consumo de energía en la industria siderúrgica mexicana" en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. 1, no. 1, p. 27.

<sup>80</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 53.

<sup>81</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 16.

### 3.1.3 Fabricación del hierro

Las fuentes principales de hierro virgen para la fabricación del acero son: el arrabio y el hierro de reducción directa (HRD), los cuáles se obtienen a través de la reducción y carburización de los óxidos contenidos en el mineral de hierro. Esta etapa es la más intensiva en el uso de la energía dentro de la manufactura del acero, consume entre el 60 y 70% de la energía total utilizada.<sup>82</sup>

Tradicionalmente el arrabio es producido en el alto horno, el cuál emplea al coque como reductor. Sin embargo, se han desarrollado nuevos procesos para obtener arrabio que utilizan carbón como agente reductor, con lo que se elimina la etapa de coquización y se evitan las emisiones generadas durante esta etapa. A estos procesos se les conoce como de fusión directa o reducción fusión.

El HRD es utilizado como una alternativa de alta calidad de la chatarra para los HEA. También se han desarrollado varios procesos para su fabricación de acuerdo al reductor empleado, ya sea gas natural o carbón; y al mineral de hierro introducido, en trozos, pélets o finos del mineral.

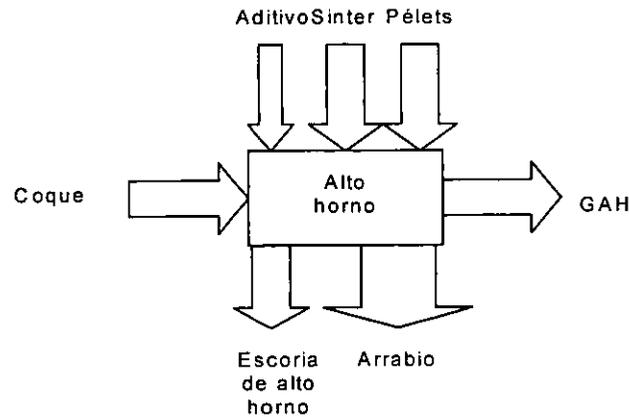
#### 3.1.3.1 Alto horno

El alto horno es un horno vertical donde el mineral de hierro es reducido en arrabio debido a las altas temperaturas y al ambiente fuertemente reductor. En la parte superior o tragante se introducen los materiales proveedores de hierro (sinter y pélets), fundentes formadores de la escoria (caliza) y el reductor (coque). En la parte inferior se inyecta un chorro de aire caliente, enriquecido con oxígeno y otros combustibles auxiliares, que fluye en contracorriente con el material introducido en la parte superior. El aire caliente reacciona con el coque produciendo monóxido de carbono (CO) que se encarga de reducir los óxidos de hierro en hierro metálico caliente. Mientras los fundentes recogen las impurezas del mineral que influyen negativamente en la calidad del hierro como son fósforo, azufre, manganeso, etc. y forman la escoria que es enfriada, granulada o peletizada y que puede ser utilizada en la industria cementera para fabricar cementos mezclados o en la construcción de carreteras. Finalmente, el gas de alto horno (GAH) se recolecta en el tragante<sup>83</sup> del horno y se emplea como combustible para calentar o para la generación de electricidad, su poder calorífico es de aproximadamente  $3.1 \text{ MJ/m}^3$ .<sup>84</sup>

<sup>82</sup> Meunier, M.Y., et.al., 1984, *Energy Efficiency in the Steel Industry with Emphasis on Developing Countries*, World Bank, technical paper no. 22, USA, p. 16.

<sup>83</sup> Tragante se le conoce a la parte superior de los hornos

<sup>84</sup> Elizalde, 1998, *Op. cit.*, p. 27.



**Figura 3. 5 Flujo de material y energía en el alto horno**

El CEE de la planta considerada como de la "mejor práctica" para el alto horno es de 11.9  $GJ_{comb}/ton$  de acero crudo y  $-0.08 GJ_e/ton$  de acero crudo, tomando en cuenta que el GAH es empleado para la generación de electricidad.<sup>85</sup>

Dentro de las principales medidas de ahorro de energía que se pueden llevar a cabo en el alto horno son: la inyección de carbón pulverizado, combustóleo, gas natural o plásticos de desecho con el fin de disminuir el requerimiento de coque; el empleo de los gases del tragante del alto horno para generar electricidad y la recuperación del calor sensible de la escoria.<sup>86</sup>

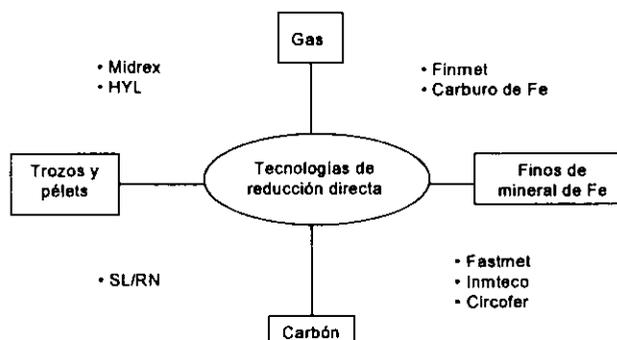
### 3.1.3.2 Reducción directa

El HRD es una alternativa de alta calidad de la chatarra en el HEA debido a su bajo contenido de carbono, se produce principalmente en países en desarrollo donde el comercio de la chatarra resulta caro y complicado, y con amplios recursos de gas natural o carbón. Como se observa en la figura 3.6 existen varias tecnologías para la reducción directa del mineral de hierro dependiendo del material introducido (trozos y pélets o finos de mineral de Fe) y del reductor (gas natural o carbón).

Los procesos basados en trozos y pélets y en la reducción del gas emplean hornos verticales de proceso continuo, entre ellos, el Midrex y el HYL. En estos, los gases reductores se obtienen a través de la oxidación parcial del gas natural, monóxido de carbono e hidrógeno, los cuáles circulan en contracorriente al hierro introducido en la parte superior del reactor. La reacción de reducción del mineral de hierro se lleva a cabo a una temperatura aproximada de  $900^{\circ}C$ , posteriormente el producto metalizado es enfriado y carburizado. Finalmente se comercializa bajo dos formas: fierro esponja o fierro briquetado en caliente (HBC).

<sup>85</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p.54

<sup>86</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 81.



Fuente: ILAFA,, 1996, "Innovaciones tecnológicas: el futuro es ahora", en *Siderúrgica latinoamericana*, ILAFA, no. 449, p.p. 44-51.

**Figura 3. 6 Tecnologías de la reducción directa de acuerdo al reductor y al material introducido**

Los procesos basados en finos del mineral y la reducción del gas emplean lechos fluidizados, entre ellos el proceso Finmet y el carburo de hierro (Iron carbide). En éstos, el gas reductor rico en hidrógeno se produce a través de una reacción del gas natural con vapor y reduce los finos del mineral a temperaturas menores a los 750°C.<sup>87</sup> El proceso Finmet produce HBC con un contenido de carbono hasta del 3%, mientras que el carburo de hierro se comercializa como finos de hierro con un contenido de carbono de hasta 6%.<sup>88</sup>

Los procesos basados en trozos y pélets de hierro y en la reducción del carbón emplean hornos rotatorios (SL/RN) donde se reduce el mineral.

Entre los procesos que emplean finos del mineral y la reducción del carbón se encuentran el Inmetco, el Fastmet y el Circofer, los cuáles utilizan hornos anulares. El carbón es pulverizado, se mezcla con el fundente y los finos del mineral para formar los pélets. Estos se introducen en un horno donde completan su reducción y son comercializados como HRD o HBC.<sup>89</sup>

El CEE para la fabricación de HRD frío en una planta HYLIII es de 10.4 GJ de combustible por tonelada de acero crudo. Esta planta cuenta con un reformador para generar el gas reductor; un calentador que eleva la temperatura de estos gases a 900°C; el reactor donde se remueve el oxígeno del mineral de hierro y un circuito de enfriamiento donde el HRD se enfría y se carburiza.<sup>90</sup> En esta planta, se recupera el calor del gas reductor y los gases de combustión del reformador para producir vapor que se emplea en el proceso de reformación y en la generación eléctrica.<sup>91</sup>

<sup>87</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 26

<sup>88</sup> Mendoza, C., 1995, "Fuentes de metálicos para la siderurgia: Desarrollo actual de procesos de reducción directa y reducción de fusión", en *Siderúrgica latinoamericana*, ILAFA, no. 426, octubre, p. 15-29.

<sup>89</sup> Mendoza, C. 1995, *Op. cit.*, p. 15-29

<sup>90</sup> McAloon, T.P., 1993, "Hylsa aims high with Monterrey modernization", en *Iron & Steel Magazine*, vol. 20, no. 7, p. 44-47.

<sup>91</sup> Quintero, R., 1995, "Avances en el proceso HYLIII de Reducción Directa", en *Memorias del Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA - 36*, 17-20 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia

### 3.1.3.3 Fusión directa o Reducción fusión

Como alternativas para la fabricación de arrabio líquido con un menor costo de inversión y menor impacto ambiental, se han desarrollado diversos procesos de fusión directa, entre los cuáles destacan: el sistema COREX; el proceso de reducción fusión directa del mineral de hierro (DIOS, por sus siglas en inglés); el horno convertidor ciclónico (CCF, por sus siglas en inglés) y el proceso Romelt.

El único proceso empleado exitosamente de manera comercial en varias plantas siderúrgicas de Sudáfrica, Corea e India, es el COREX, el cuál presenta las siguientes ventajas: un bajo costo de inversión; la flexibilidad en el mineral de hierro introducido, ya sea en trozos, pélets o sinter; el empleo de diversos tipos de carbón como reductor, al no utilizar coque se evitan las emisiones generadas durante la coquización; y la generación de gases de desecho que pueden ser usados en la producción de electricidad, en la fabricación de HRD o para usos propios de calentamiento en la planta.

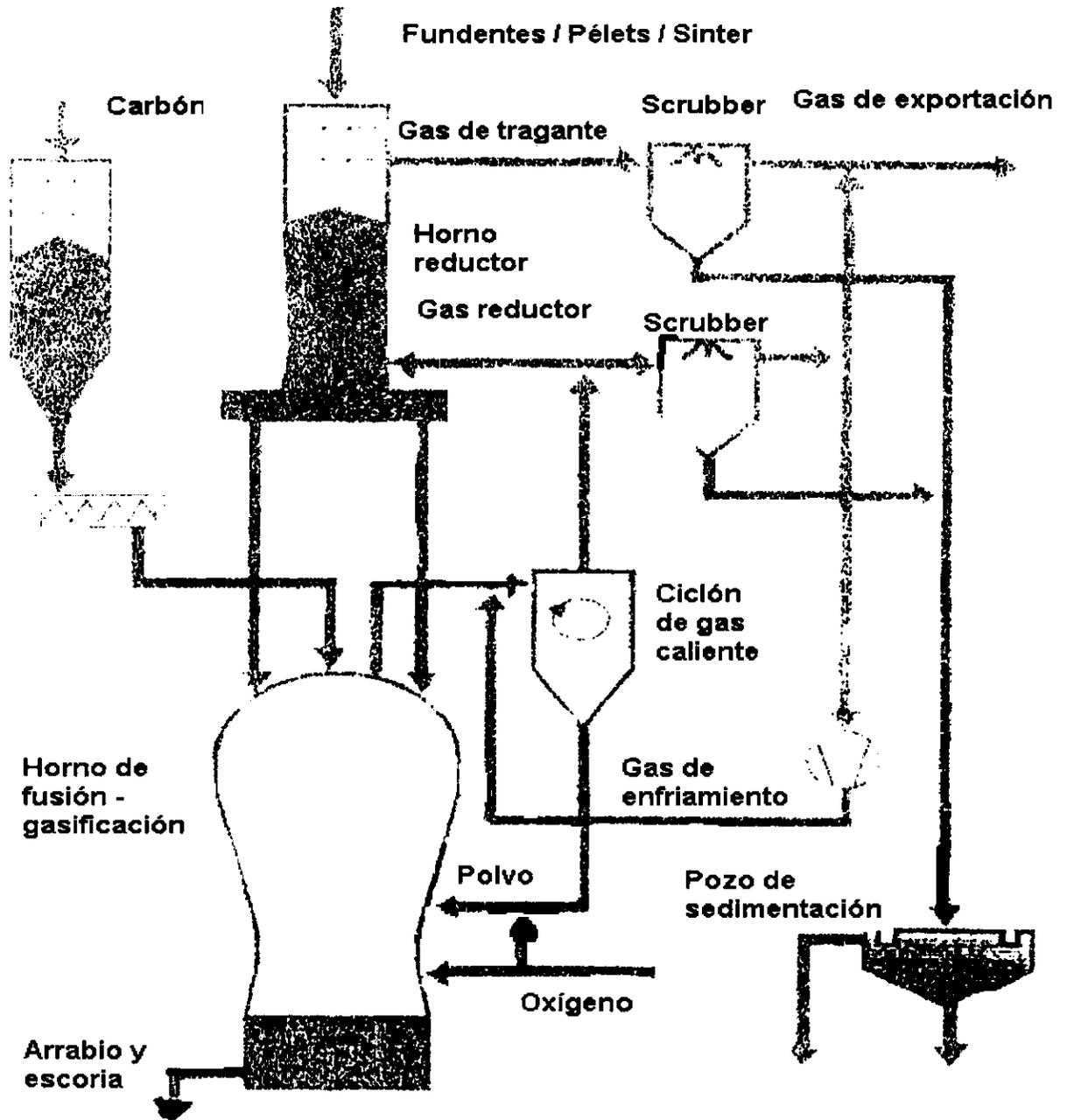
Como se observa en la figura 3.7, en el proceso COREX, el mineral de hierro es introducido en un horno de reducción donde es transformado a HRD mediante el flujo de gases reductores en contracorriente. Posteriormente el HRD es alimentado en un horno de fusión-gasificación, donde se generan los gases reductores (monóxido de carbono e hidrógeno) como resultado de la gasificación del carbón con el oxígeno a temperaturas de 1000°C en la cúpula del horno, además se llevan a cabo la reducción final y las reacciones necesarias del metal y de la escoria. El sistema también cuenta con un ciclón de gas caliente que separa los finos de carbón, las cenizas y el polvo del mineral del gas reductor para reciclar adecuadamente los polvos del mineral en el proceso y el gas reductor en el horno de reducción. Cuenta también con un sistema de recolección y limpieza de los gases de tragante que son exportados para los usos mencionados en el párrafo anterior.

Este proceso puede ser empleado tanto en rutas COREX-CBO como en rutas COREX/HRD-HEA para pequeñas y grandes capacidades.<sup>92</sup>

La primera planta comercial COREX establecida en Sudáfrica produce arrabio líquido con un CEE de 17 GJ de energía primaria por tonelada de arrabio caliente. Sin embargo, se estima que las nuevas plantas tienen un CEE de 20.4 GJ de combustible y  $-2.1 \text{ GJ}_e$  por tonelada de arrabio caliente, tomando en cuenta que los gases de tragante son empleados para la generación de electricidad.<sup>93</sup>

<sup>92</sup> Eberle, A., et.al., 1995, "Tecnología de RD Corex plus –La base de la siderúrgica del futuro –", en el Congreso Latinoamericano de Siderurgia ILAFA – 36, 17-20 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia

<sup>93</sup> Worrell, E. y C. Moore, 1997, "Energy efficiency and advanced technologies in the Iron and Steel industry" en 1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry Proceedings, Estados Unidos.



Fuente: Eberle, et.al., 1997 "Tecnología de RD Corex plus -La base de la siderúrgica del futuro-", en el Congreso Latinoamericano de Siderurgia ILAFA - 36, 17-20 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia

Figura 3. 7 Diagrama de flujo de materiales y energía en el proceso COREX

### 3.1.4 Fabricación del acero

El acero líquido se obtiene al oxidar el arrabio en los hornos HHA y en los CBO, o al derretir el HRD y la chatarra en los HEA. Durante esta etapa es importante darle la composición adecuada de acuerdo al uso que se le quiera dar, es decir, obtener el nivel deseado de carbono,

fósforo, manganeso y silicio; así como de azufre, el cuál es una impureza con propiedades negativas para el acero. Es importante mencionar que a mayor carbono, se tiene una mayor dureza en el acero; mientras que a menor carbono, el acero tiene una mayor maleabilidad. Finalmente el acero debe ser solidificado en una forma adecuada para el rolado en caliente.

La chatarra puede ser introducida en el proceso de fabricación del acero tanto en el CBO como en el HEA, y se clasifica de la siguiente manera: chatarra interna de recicló, que se obtiene como subproducto en el propio proceso siderúrgico y es adecuada para ser fundida nuevamente; chatarra de proceso, que se genera durante los procesos de transformación industriales del acero como son los automóviles, latas y estructuras metálicas; y chatarra recuperada u obsoleta, que se recuperan de los desperdicios metálicos y equipos con contenido de hierro y acero que han llegado al término de su vida útil.<sup>94</sup>

El empleo de la chatarra es lo más adecuado desde el punto de vista energético y ambiental, ya que la energía necesaria para refundir la chatarra de acero es un tercio de la necesaria para reducir el mineral de hierro.<sup>95</sup> Sin embargo, su uso dependerá de su disponibilidad, precio, composición química, grado de impurezas y de la infraestructura con la que cuenten las plantas para recuperarla y procesarla.

#### 3.1.4.1 Convertidor básico al oxígeno (CBO)

El convertidor es alimentado con arrabio líquido; chatarra, que no debe exceder del 30%; y fundentes.<sup>96</sup>

Dentro del convertidor se inyecta una lanza vertical de oxígeno la cuál oxida al carbono contenido en el arrabio y libera monóxido y dióxido de carbono. El silicio, el manganeso y el fósforo también se oxidan y son recogidos por el fundente en forma de escoria.

Este proceso casi no requiere energía, ya que las reacciones entre el silicio, carbono y el oxígeno son altamente exotérmicas mientras que la chatarra introducida compensa esta elevación de temperatura.

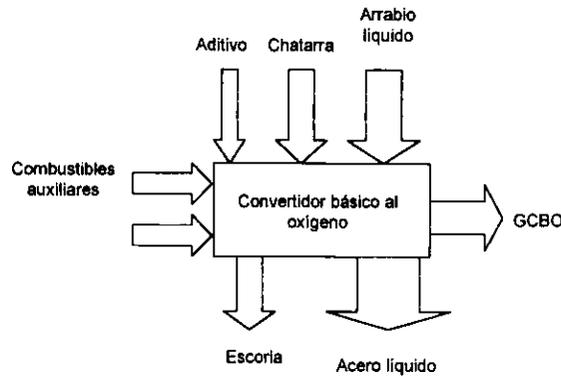
Por otra parte, los subproductos de este proceso son: el gas de CBO que es utilizado como combustible gaseoso con un poder calorífico de 8.8 MJ/m<sup>3</sup> a 1200°C<sup>97</sup> y la escoria que se comercializa con la industria cementera.

<sup>94</sup> Mendoza, 1995, *Op. cit.*, p. 16-17

<sup>95</sup> Hattori, M., "La planta integrada del futuro", en el Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA – 38, p. 7

<sup>96</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 19

<sup>97</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 55



**Figura 3. 8 Flujo de materiales y energía del CBO**

El CEE del CBO en la planta considerada como la “mejor práctica” es de 0.05 GJ<sub>comb</sub> y de 0.08 GJ<sub>e</sub> por tonelada de acero crudo.<sup>98</sup> Esta planta supone una carga metálica del 90%.<sup>99</sup>

Las principales medidas de ahorro de energía en esta etapa son: el empleo del gas de CBO para producir vapor, un incremento del uso de chatarra, el uso de un sistema de almacenamiento del oxígeno, la recuperación del calor sensible de la escoria, la utilización de un sistema de sople combinado para la inyección de combustibles auxiliares. Para reducir la electricidad se recomienda utilizar controles variables de velocidad para bombas, ventiladores, etc. y sistemas de control para optimizar la recolección de los gases CBO y minimizar las pérdidas.<sup>100</sup>

#### 3.1.4.2 Horno de hogar abierto

El horno de hogar abierto, también conocido como horno Siemens-Martin, es un proceso obsoleto que requiere una gran cantidad de energía, trabaja por lotes y el ciclo de cada lote es de aproximadamente 10 horas.

La óptima carga de arrabio líquido es entre 30 y 60%, lo restante se compone de chatarra, fundente y oxígeno. En comparación con el CBO, el HHA introduce una mayor cantidad de chatarra, aunque una mayor cantidad de ésta implica un mayor consumo de energía para derretirla.<sup>101</sup>

En el HHA, primero se introduce el fundente, posteriormente la chatarra y una vez que está parcialmente fundida se le agrega el arrabio líquido. Las reacciones de oxidación que se llevan a cabo en este horno son las mismas que en el CBO, el carbono contenido en el arrabio se oxida y

<sup>98</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 55

<sup>99</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 55

<sup>100</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 84

<sup>101</sup> Meunier, 1984, *Op. cit.*, p. 18

forma el gas reductor (monóxido de carbono), y el fundente recoge las impurezas de silicio, manganeso, fósforo y azufre en forma de escoria la cuál forma una capa en la parte superior.

El CEE de un HHA empleado en una planta de Alemania Democrática (anterior a la unificación) que introduce un 23% de chatarra es de 6.7 GJ por tonelada de acero crudo.<sup>102</sup>

### 3.1.4.3 Horno eléctrico de arco

El horno de arco eléctrico es utilizado en dos rutas: HRD-HEA o chatarra-HEA. Si se emplea el proceso HRD-HEA se introduce hasta un 20% de chatarra y por lo tanto el 80% restante es alimentado con HRD, fundentes y metales para aleaciones. Si se emplea el proceso chatarra-HEA, el HEA es alimentado hasta con un 95% de chatarra y el 5% restante son fundentes y metales de aleación.<sup>103</sup>

En el HEA, el material es derretido por el calor generado al producir un arco eléctrico (corto circuito) entre los electrodos de carbono y el metal. El voltaje generado en el arco eléctrico es de aproximadamente 6000 V, que eleva la temperatura hasta unos 4000°C en unos cuantos segundos. Además del calor generado por el arco eléctrico, se inyecta gas natural, carbón o combustóleo para mejorar el calentamiento de la chatarra y oxígeno para maximizar la combustión.<sup>104</sup>

La eficiencia energética del HEA mejora notablemente al maximizar la cantidad de acero derretido y al disminuir las pérdidas por calor dependientes del tiempo, por lo que primero, se derrite la chatarra o el HRD en hornos de ultra alta potencia y posteriormente se obtiene en forma separada la composición y las propiedades requeridas en el acero a través de una refinación secundaria en hornos de olla o de cuchara.

El CEE de la "mejor práctica" para esta etapa es de 0.77 GJ de combustible y 1.48 GJ eléctricos por tonelada de acero crudo.<sup>105</sup>

Las principales medidas de eficiencia energética en esta etapa son: el precalentamiento de la chatarra utilizando los gases de desperdicio de otras etapas; la inyección de carbón pulverizado que evita las pérdidas metálicas excesivas y crea una escoria espumosa que incrementa la eficiencia de intercambio de calor en el horno; el empleo de quemadores de oxígeno y combustible, como fuentes secundarias de calor, que ayuden a fundir la chatarra en los puntos fríos del horno y entre los electrodos; la implantación de sistemas de control; el uso de electrodos refrigerados con agua, para disminuir el consumo de este material de operación; el empleo de los hornos de

<sup>102</sup> Naciones Unidas, 1990, *The recuperation and economic utilization of by-products of the iron and steel industry*, ECE Industry and Technology division, Nueva York, E.U.A., p. 107-110

<sup>103</sup> Meunier, 1984, *Op. cit.*, p. 18

<sup>104</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p.20-21

<sup>105</sup> Worrell, E, 1996, *Op. cit.*, p. 29

corriente directa, que utiliza un solo electrodo o de los hornos de plasma, que generan una alta temperatura para una mejor obtención de aceros de aleación.<sup>106</sup>

### 3.1.5 Refinación secundaria

La refinación secundaria tiene como función ajustar la composición del acero líquido que se obtiene en el HHA, CBO o HEA a través de la adición de ferroaleaciones para darle las propiedades físicas, químicas y mecánicas requeridas antes de la etapa de colado. Por ejemplo, el cromo proporciona resistencia a la abrasión y corrosión; el manganeso permite ductibilidad y tenacidad.

El proceso consiste en introducir un sistema de electrodos dentro de la olla donde se encuentra el acero líquido, el cuál es calentado para compensar la temperatura debido a la añadidura de las ferroaleaciones; además, se agregan agentes fundentes apropiados que formen la escoria con los elementos no deseados y el acero se remueve electromagnéticamente o con un gas inerte para integrar en él las ferroaleaciones.<sup>107</sup>

### 3.1.6 Colada

A través del colado el acero líquido es transformado en productos semi acabados dependiendo de las especificaciones metalúrgicas y de rolado que se requieran. Actualmente, la mayor parte del acero producido es colado continuamente debido a que en este proceso se emplea más eficientemente la energía y se reducen las pérdidas de material.

#### 3.1.6.1 Por lingotes

El acero líquido se vacía en moldes llamados lingoteras. Posteriormente los lingotes se recalientan y son transportados hacia un molino debastador que se encarga de convertirlos en planchones o en tochos. De los lingotes se obtienen los tubos sin costura después de una etapa de laminación en caliente y en frío. De los planchones se obtienen varios productos planos como son las placas, las tiras, la hojalata, etc. a través de la laminación en caliente, en frío y los procesos de acabado. Finalmente de los tochos se obtienen productos no planos como los perfiles estructurales y las palanquillas de los cuáles se elaboran los perfiles ligeros y el alambrón.

---

<sup>106</sup> Solinis, R., 1984, "25 años de Desarrollo Tecnológico en las acerías eléctricas de América Latina", en *Memorias del Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA* – 25, p. 1-4

<sup>107</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 22

### 3.1.6.2 Colada continua

En la colada continua se producen directamente los planchones y los tochos, eliminando las etapas de recalentamiento y de laminación de lingotes para obtener planchones y tochos.

El acero líquido es descargado en una vasija a una altura predeterminada, posteriormente es vaciado en moldes oscilatorios de cobre enfriados con agua. El acero que está en contacto con el molde forma una cubierta sólida. La cubierta solidificada y el núcleo, aún líquido, son removidos del molde y enviados hacia unos rodillos donde se solidifican completamente con la ayuda de rociadores de agua. La velocidad de vaciado y de retiro de los moldes debe ser regulada para que el nivel del acero permanezca constante, esta velocidad generalmente es del orden de 0.5 a 2 metros por minuto dependiendo de la calidad requerida y de las dimensiones del producto. La velocidad de vaciado es inversamente proporcional al espesor del planchón, es decir, a menor espesor, mayor velocidad. Finalmente la pieza es cortada mecánicamente o con un soplete dependiendo de su espesor.<sup>108</sup>

El CEE de la "mejor práctica" en esta etapa es de 0.02 GJ de combustible y de 0.04 GJ eléctricos por tonelada de acero crudo.<sup>109</sup>

Dentro de las medidas de ahorro de energía que se pueden llevar a cabo en esta etapa se encuentra la colada continua próxima a la forma final (*near shape casting*) también conocida como colada de planchones delgados (*thin slab casting*) en los cuáles en lugar de producir planchones de 120 a 300 mm de espesor se obtienen planchones de 30 a 60 mm, los cuáles son recalentados y pasados a través de un sistema de molinos de laminación en caliente más simple.

### 3.1.7 Laminación

Varios productos planos y no planos se obtienen a través de la laminación en caliente y en frío de lingotes, planchones y tochos.

#### 3.1.7.1 Laminación en caliente

La laminación en caliente transforma la forma y las propiedades metalúrgicas de los planchones en productos finales como son las láminas y las placas; y los tochos, en perfiles estructurales, perfiles ligeros y alambrón.

Antes de pasar a la laminación en caliente, los planchones y los tochos son enfriados y examinados para remover las imperfecciones, posteriormente son recalentados nuevamente a altas temperaturas para introducirlos en una serie de rodillos eléctricos. Primero comienzan en un

<sup>108</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 22

<sup>109</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p.56.

molino donde se realiza una transformación gruesa de su tamaño y su forma, terminan en un molino que les da las especificaciones del producto final. Los rollos de los productos planos son enviados al laminado en frío o son cortados y vendidos.<sup>110</sup>

El CEE de esta etapa para la planta considerada como la “mejor práctica” es de 1.37 GJ<sub>comb</sub> y de 0.28 GJ<sub>e</sub> por tonelada de acero crudo.<sup>111</sup>

Las medidas de eficiencia energética en esta etapa se deben concentrar en disminuir el consumo energético en el recalentamiento del material colado, ya sea utilizando una zona de precalentamiento que emplee gases de desecho, mejorando los quemadores en los hornos de recalentamiento, optimizando la combustión a través del control automatizado en los hornos, etc. Otra medida puede ser la laminación directa en caliente, donde el material colado es directamente transportado a los molinos de laminación a una temperatura aproximada de 700°C, sin embargo, para ello se requiere una alta calidad de los planchones y el funcionamiento óptimo y coordinado de las líneas de colada y laminación.<sup>112</sup>

El consumo específico en esta etapa está ampliamente relacionado con la productividad. En el caso de las palanquillas se propone la laminación continua de éstas, soldando la cabeza de la que sale del horno de recalentamiento con la cola de la que se introdujo en el molino debastador, con ello se incrementa notablemente tanto la producción como el rendimiento del material sin un aumento importante en el consumo energético.<sup>113</sup>

#### 3.1.7.2 Laminación en frío

Si se desea obtener laminados planos de menor espesor y con propiedades metalúrgicas específicas, como la hojalata, los productos laminados en caliente son conducidos por el proceso de decapado donde la capa de óxidos que se forma durante la laminación en caliente es removida empleando ácido clorhídrico, sulfúrico o nítrico. A continuación, el espesor de estos productos es reducido en frío circulándolos a través de rodillos. Posteriormente se emplean los procesos de lavado electrolítico, recocido y templado para que estos productos adquieran ciertas propiedades metalúrgicas. Finalmente, los productos siderúrgicos pasan a través de un molino que aplanan y mejora la dureza de su superficie.<sup>114</sup>

<sup>110</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 23.

<sup>111</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 56.

<sup>112</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 85

<sup>113</sup> Lestani, M., et.al., 1998, “El proceso de laminación continua con soldadura” en *Siderurgia Acero y Desarrollo*, vol. IX, no. 61, noviembre, p. 21-26.

<sup>114</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p. 24-25

El CEE de la "mejor práctica" considerando que la planta emplea líneas de decapado, lavado, recocido y templado es de 0.33 GJ<sub>comb</sub>/ton de acero crudo y de 0.16 GJ<sub>e</sub>/ton de acero crudo.<sup>115</sup>

Los combustibles en el proceso de decapado, laminado, recocido y templado se emplean en la generación de vapor para los baños de ácido y para la recuperación de los ácidos; para obtener las temperaturas en los hornos de recocido; y la electricidad, para los molinos de laminación, las bombas de enfriamiento y ventiladores.

Las medidas recomendadas en esta etapa son: la recuperación de calor y el mejoramiento de la productividad en los molinos.

### 3.1.8 Acabado

Finalmente con el objetivo de proteger o decorar los productos siderúrgicos, éstos son recubiertos con capas metálicas o no metálicas. Para las capas metálicas, en el caso de recubrimientos de zinc y aleaciones zinc-aluminio, los productos son sumergidos en un baño del material derretido; en el caso del estaño, níquel o cobre, se emplea la deposición electrolítica utilizando los productos siderúrgicos como electrodos. Para las capas no metálicas, los productos se rocían, se sumergen en pinturas, barnices o lacas para recubrirlos.<sup>116</sup>

## 3.2 Antecedentes históricos y situación actual de la industria siderúrgica en México

La historia de la industria siderúrgica mexicana comenzó en 1903 con la construcción de la primera planta integrada en este país y en América Latina: Fundidora de Monterrey (FUMOSA). Para satisfacer la creciente demanda del acero a finales de los cuarentas, esta planta fue modernizada y desde entonces nuevas empresas han construido plantas integradas: Altos Hornos de México (AHMSA) en 1944; Hojalata y Lámina (HYLSA) en 1957, la cuál ha desarrollado su propia tecnología para fabricar HRD; Tubos de Acero de México (TAMSA) en 1959 y Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas (SICARTSA) en 1976. Algunas empresas, como AHMSA, adquirieron equipos usados en sus inicios.<sup>117</sup>

Entre 1940 y 1980, el gobierno mexicano apoyó el crecimiento de la industria siderúrgica a través de subsidios de energéticos y transporte ferroviario, incentivos fiscales, facilidades crediticias, protección arancelaria, etc. para producir acero que promoviera la construcción de

<sup>115</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 57.

<sup>116</sup> IISI y UNEP, 1997, *Op. cit.*, p.25.

<sup>117</sup> Rueda, I. (Coordinadora), 1994, *Tras las huellas de la privatización: El caso de Altos Hornos de México*, Siglo veintiuno editores, México, D.F., primera edición, p. 44.

infraestructura y la electrificación del país. A partir de 1972, con el objetivo de satisfacer esta creciente demanda de acero se realizaron importantes inversiones para la modernización de AHMSA y SICARTSA, las cuáles adquirieron nuevos equipos de avanzada tecnología.

En 1977, el Estado formó el grupo denominado Sidermex para optimizar la productividad de las empresas paraestatales: AHMSA, FUMOSA y SICARTSA. Sin embargo, este corporativo no mejoró mucho la situación existente en estas industrias.<sup>118</sup>

A partir de 1982 se presentó una grave crisis económica y la devaluación del peso, lo que ocasionó que surgieran problemas económicos en la industria siderúrgica debido a las altas deudas adquiridas para su expansión en la década anterior. Ante esta situación, el gobierno mexicano se apropió de los pasivos de las empresas paraestatales y apoyó a las privadas para evitar que se fueran a la bancarrota.<sup>119</sup> Sin embargo, en 1986 FUMOSA cerró debido a su improductividad y a sus altos costos.

Bajo la política neoliberal del gobierno mexicano, comenzó la privatización de las industrias siderúrgicas paraestatales en 1988. Para ello, se consiguió el apoyo del Banco Mundial el cuál otorgó un crédito con las siguientes condiciones: la liberación de los precios del acero, la reducción de tarifas arancelarias, el control de la contaminación ambiental, la capacitación intensiva del personal, la racionalización de los recursos humanos y la inversión del gobierno en ciertas áreas estratégicas.<sup>120</sup> La privatización se completó a finales de 1991: AHMSA fue adquirida por el Grupo Acerero del Norte (GAN); SICARTSA fue vendida parte al Grupo Villacero y parte a Tubacero. Desde entonces, la inversión en la expansión y modernización de las plantas ha crecido y se espera que continúe hasta el año 2000.<sup>121</sup>

A partir de la privatización de las empresas siderúrgicas paraestatales, la producción nacional de acero creció a una tasa anual del 8.7%, de 7.96 millones de toneladas de acero en 1991 a 14.25 millones de toneladas en 1997. AHMSA, una de las principales empresas siderúrgicas privatizadas, mejoró su productividad, aumentó su producción de acero líquido e incrementó su rendimiento de acero a producto terminado;<sup>122</sup> a pesar de estas mejoras productivas, su situación financiera actual es difícil ya que su deuda asciende a 1800 millones de dólares, lo cuál representa casi la mitad de sus activos reportados en 1998.<sup>123</sup>

---

<sup>118</sup> Rueda, P., 1994, *Op. cit.*, p. 73

<sup>119</sup> Rueda, P., 1994, , *Op. cit.*, p. 52

<sup>120</sup> Rueda, P., 1994, *Op. cit.*, p. 82

<sup>121</sup> Baro, E., 1997, "México: entre los primeros 15 del mundo", en *Acero North American Steel Journal*, Vol. 2, no. 3, marzo, p.p. 18-20

<sup>122</sup> Martínez, C., 1999, "La alianza y refinanciar deudas con bancos, los grandes retos de AHMSA" en el periódico *La Jornada*, jueves 12 de agosto de 1999, sección Economía, p. 19

<sup>123</sup> Brito, J., 1999, "Insuficiente el Plan de Ajuste de Altos Homos: Inversionistas", en el periódico *Excélsior*, sábado 10 de julio de 1999, año LXXXIII, tomo IV, sección Financiera, p. 1

Por otro lado, la capacidad instalada de las plantas semiintegradas que emplean chatarra o HRD se incrementaron lentamente de 1970 a 1985, sin embargo, a partir de 1985 han crecido rápidamente, como se observa en la tabla 3.1.

**Tabla 3. 1 Capacidad instalada de la industria siderúrgica mexicana [Mton anuales]**

Plantas	Proceso	Inicio	1976	1986	1993
<b>Integradas</b>					
AHMSA	AH-CBO	1944	3.75	4.32	2.82
Fumosa	AH-HHA	1903	1.42	Cerrada	Cerrada
SICARTSA	AH-CBO	1976	1.20	1.20	1.20
HYLSA	HRD-HEA	1957	1.55	1.70	3.73
TAMSA	HRD-HEA	1959	0.43	0.47	0.66
SICARTSA	AH-CBO	1986	-	2.00	3.16
	HRD-HEA				
<b>Total</b>			8.35	9.69	13.27
<b>Semiintegradas</b>					
Miniplantas	HRD-HEA		1.35	1.63	4.81
	Chatarra-HEA				
<b>Total</b>			1.35	1.63	4.81

Fuente: I&M, varios años, PEMEX, 1985.

Como se mencionó anteriormente HYLSA, perteneciente al Grupo Alfa, desarrolló las tecnologías HYLI y HYLIII para la fabricación de HRD que se han exportado a países como India, Indonesia, Malasia, Brasil, Irán y Venezuela. Actualmente de la producción mundial de HRD, el 11.1% se produce con el proceso HYLI y el 14.5% con el proceso HYLIII.<sup>124</sup> La planta más nueva de HRD en México es la 4M de HYLSA que inició operaciones en abril de 1998 la cuál cuenta con la mejor tecnología HYL disponible.<sup>125</sup>

### 3.3 Perspectivas de la producción y consumo de energía en México

La industria siderúrgica mexicana es la industria más intensiva en el uso de la energía del sector industrial. En 1995, esta industria consumió 17.2% del consumo final de este sector.<sup>126</sup>

Se observa en la figura 3.9 que tanto la producción de hierro como la de acero se ha incrementado fuertemente de 1970 a 1995, el hierro con una tasa de crecimiento anual del 5.0%, mientras que el acero ha aumentado en un 4.7%. En el mismo periodo, el CEE<sub>p</sub> disminuyó de 31.3 a 23.2 GJ/ton de acero crudo.

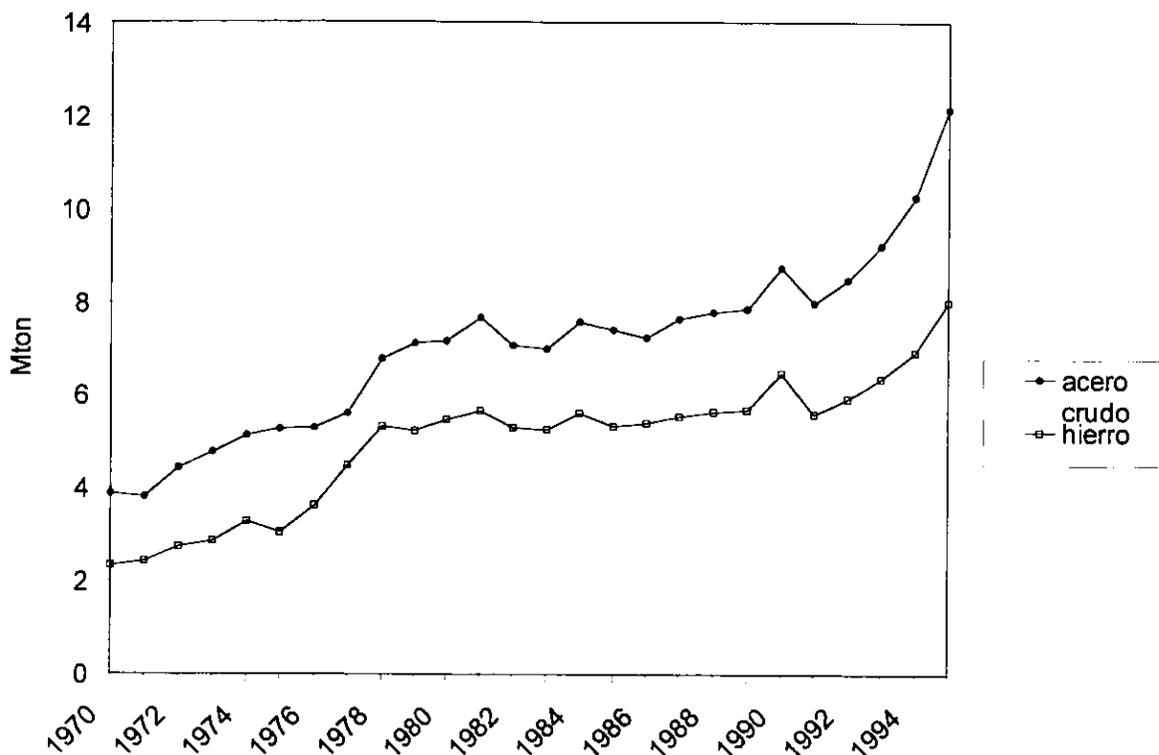
En la figura 3.9 se observa que tanto la producción del acero como la del hierro tienen una tendencia similar, se incrementaron de 1970 a 1981, se mantuvieron estables hasta 1989,

<sup>124</sup> ILAFA, 1995, "Reducción Directa Hoy: Crecimiento con Paso Firme", en Siderúrgica latinoamericana, ILAFA, no. 426, p.p. 2-14.

<sup>125</sup> Scarnati, Thomas (editor), 1999, "The HYL HYTEMP EAF Minimill" en *HYL report, The Direct Reduction Quarterly*, Vol. XIII, no. 2, p.4-6.

<sup>126</sup> SE, 1996, *Balance Nacional de Energía*, México, D.F., p. 66.

crecieron repentinamente en 1990, disminuyeron en 1991 y aumentaron nuevamente de 1991 a 1995.

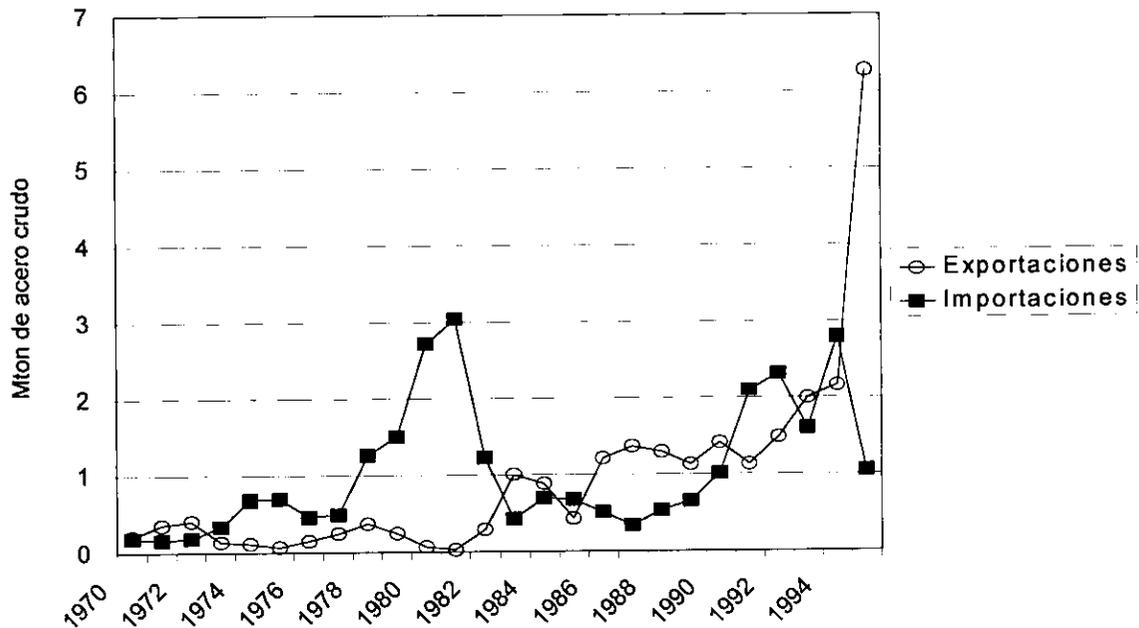


Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F..

**Figura 3. 9 Producción de hierro y acero de la industria siderúrgica mexicana**

El comportamiento de esta rama industrial depende en gran medida de la economía nacional, así como del crecimiento de la industria de la construcción, de la automotriz y de la de maquinaria. De 1970 a 1981, las actividades petroleras favorecieron el crecimiento económico y a su vez la demanda de productos siderúrgicos, sin embargo, se requirió importar pequeñas cantidades de acero debido a que la oferta no fue suficiente (ver figura 3.10). Entre 1981 y 1989, la producción siderúrgica se vio afectada por una crisis económica durante los primeros años. Esta crisis provocó que la actividad industrial disminuyera y con ella la demanda interna de acero, a pesar de ello se procuró reducir las importaciones e impulsar las exportaciones a partir de 1982. Durante 1989 a 1991, las empresas siderúrgicas comenzaron a privatizarse, mientras que la demanda interna aumentó debido a una reactivación de la actividad industrial favorecida por la inversión extranjera. Finalmente, de 1991 a 1995, la producción de hierro y acero aumentó vertiginosamente a la par del crecimiento de la economía y respaldada por las exportaciones y por la producción de la industria automotriz. Sin embargo, la crisis económica en 1994 ocasionó que la

producción de hierro se mantuviera en el mismo nivel, mientras que la del acero continuó incrementándose debido a las exportaciones.

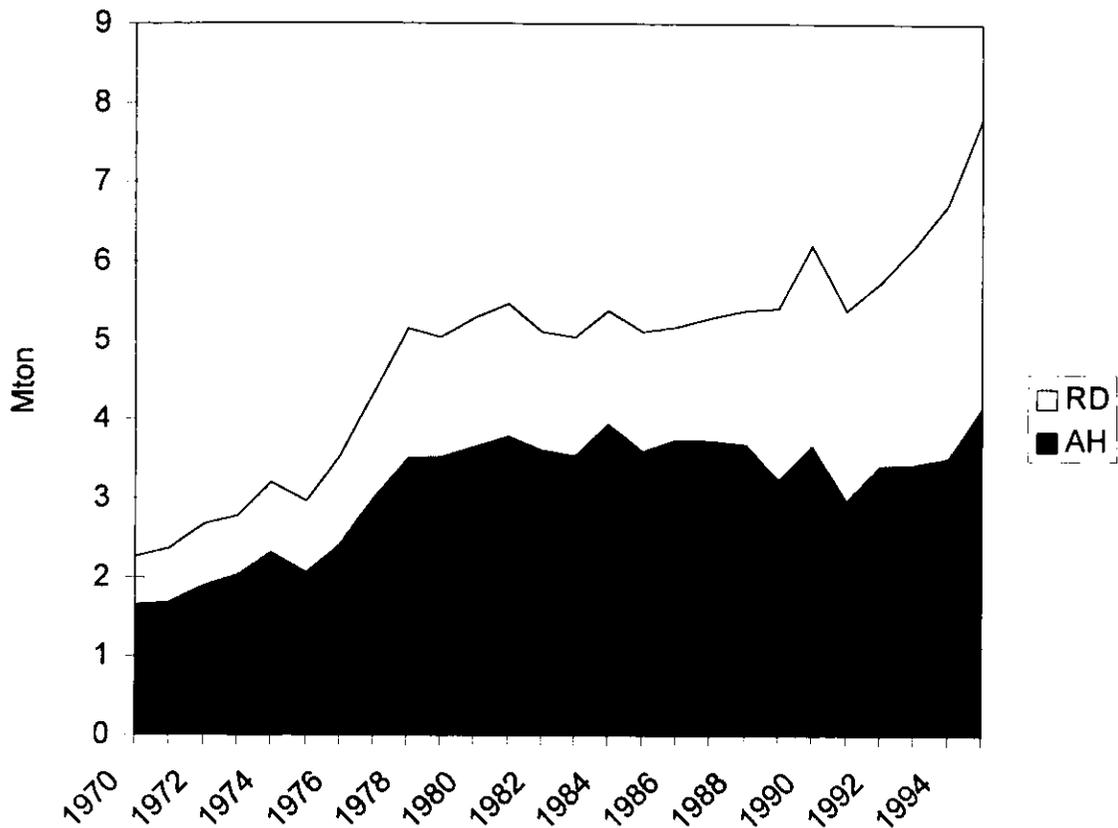


Fuente: IISI, 1997, Steel Statistics of Developing Countries, p. 47-48

**Figura 3. 10 Importaciones y exportaciones de acero crudo de la industria siderúrgica mexicana 1970-1995**

En la etapa de fabricación del hierro, tanto la producción del arrabio como del HRD se comportaron de manera semejante. Sin embargo, la producción de HRD incrementó notablemente su participación dentro de la producción nacional de hierro en los últimos años, ésta creció a una tasa anual del 7.4% mientras que la producción de arrabio aumentó a una tasa del 3.8%. Esto se debió al elevado costo de la chatarra, que en México generalmente se importa. Por otro lado, la participación de la producción de arrabio ha disminuido debido a que la construcción o ampliación de plantas basadas en el alto horno que requieren coque como materia prima, lo que implica altos costos de inversión en las coquerías y problemas de impacto ambiental.

En 1994, México produjo 3.2 toneladas de HRD, siendo el segundo productor de HRD en el mundo.



Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

**Figura 3. 11 Producción de arrabio y fierro esponja de la industria siderúrgica mexicana**

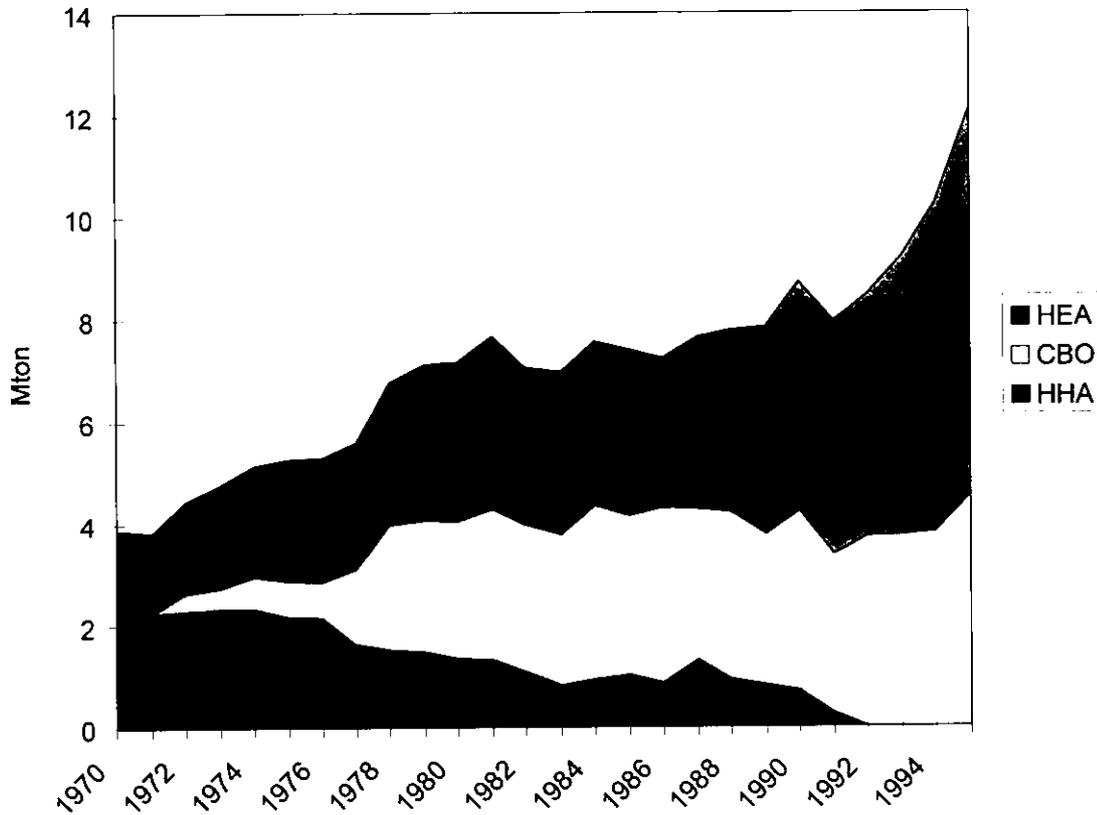
**Tabla 3. 2 Producción mexicana de hierro por proceso [millones de toneladas]**

	1970	1975	1980	1985	1990	1995
<b>Alto horno</b>						
Producción[Mton]	1.65	2.05	3.64	3.60	3.67	4.13
[%]	70.4	66.9	66.6	67.5	56.8	51.7
<b>Reducción directa</b>						
Producción[Mton]	0.62	0.91	1.64	1.50	2.53	3.67
[%]	26.4	29.9	30.0	28.2	39.1	46.0
<b>Ferroaleaciones</b>						
Producción[Mton]	0.08	0.10	0.19	0.23	0.26	0.19
[%]	3.2	3.2	3.4	4.3	4.1	2.3
<b>Producción TOTAL</b>	<b>2.34</b>	<b>3.06</b>	<b>5.46</b>	<b>5.32</b>	<b>6.45</b>	<b>7.99</b>

Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F. 1997.

Los procesos empleados dentro de la etapa de formación del acero dependen en gran medida del hierro producido en la etapa anterior. En 1970, el arrabio era introducido en los HHA en las plantas integradas, sin embargo, a partir de la penetración de la tecnología del CBO en 1971, la producción de los HHA fue reemplazada por la de los CBO debido a su bajo consumo de

combustibles y a su mayor productividad, hasta que finalmente desapareció en 1992. Por otro lado, el HEA introduce HRD y/o chatarra y es empleado tanto en las plantas integradas como en las semiintegradas. De 1970 a 1995, la producción en los HEA se ha incrementado notablemente sobre todo en los últimos diez años debido a un aumento significativo en la producción de HRD y al crecimiento de la capacidad instalada de las plantas semiintegradas.



Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, varios años; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

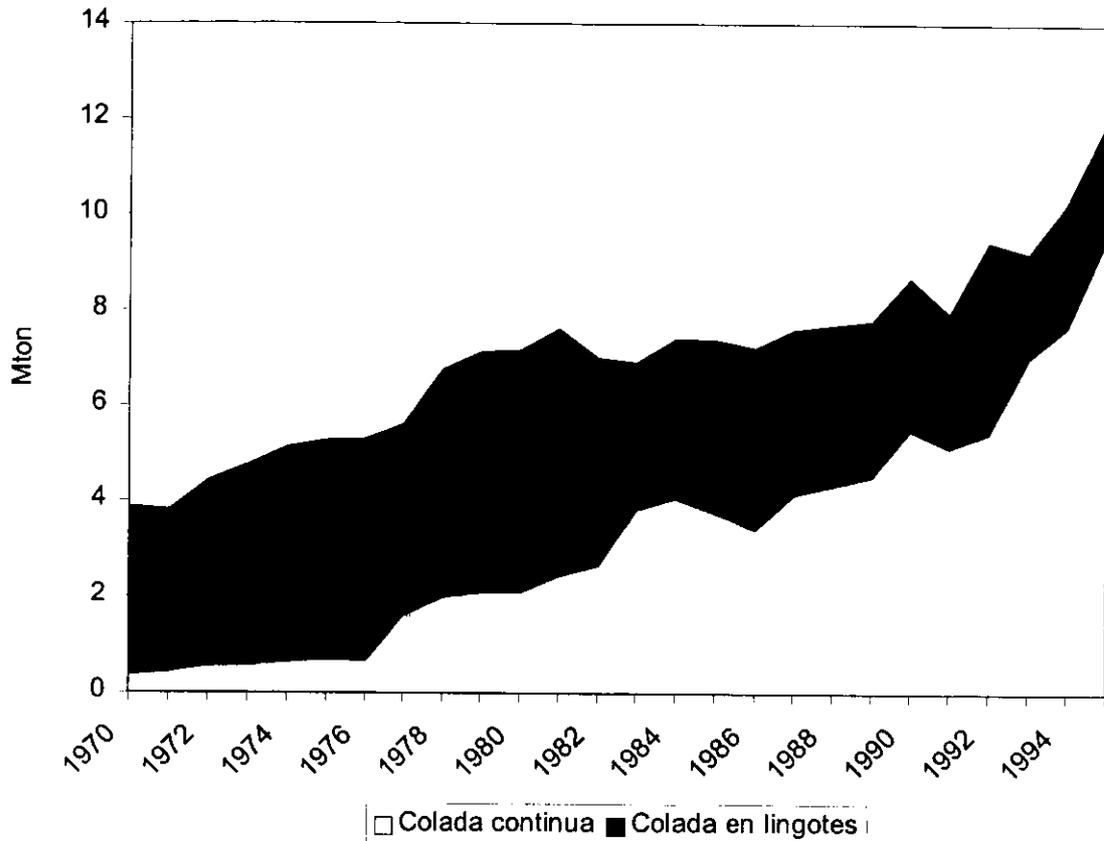
**Figura 3. 12 Producción de acero en hornos de hogar abierto, convertidores al oxígeno y hornos de arco eléctrico 1970-1995**

**Tabla 3. 3 Producción de acero por proceso en la industria siderúrgica mexicana [millones de toneladas]**

		1970	1975	1980	1985	1990	1995
HHA	Producción[Mton]	2.28	2.19	1.35	1.02	0.71	0.00
	[%]	58.9	41.4	18.9	13.8	8.2	0.0
CBO	Producción[Mton]	0.00	0.69	2.69	3.14	3.53	4.54
	[%]	0.0	13.0	37.6	42.4	40.4	37.4
HEA	Producción[Mton]	1.60	2.40	3.12	3.24	4.49	7.59
	[%]	41.1	45.5	43.6	43.8	51.4	62.6
<b>PRODUCCIÓN TOTAL</b>		<b>3.88</b>	<b>5.27</b>	<b>7.16</b>	<b>7.4</b>	<b>8.73</b>	<b>12.1</b>

Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

En la etapa siguiente, el acero líquido es colado tanto en lingotes o de manera continua para obtener planchones, perfiles rectangulares y redondos. Sin embargo, el empleo de este último proceso aumentó del 9.8% en 1970 al 79.8% en 1995, lo que ha mejorado notablemente la eficiencia energética del proceso.



Fuente: IISI, varios años, *Steel Statistics of Developing Countries*; OECD, selected years, *World Steel Trade*.

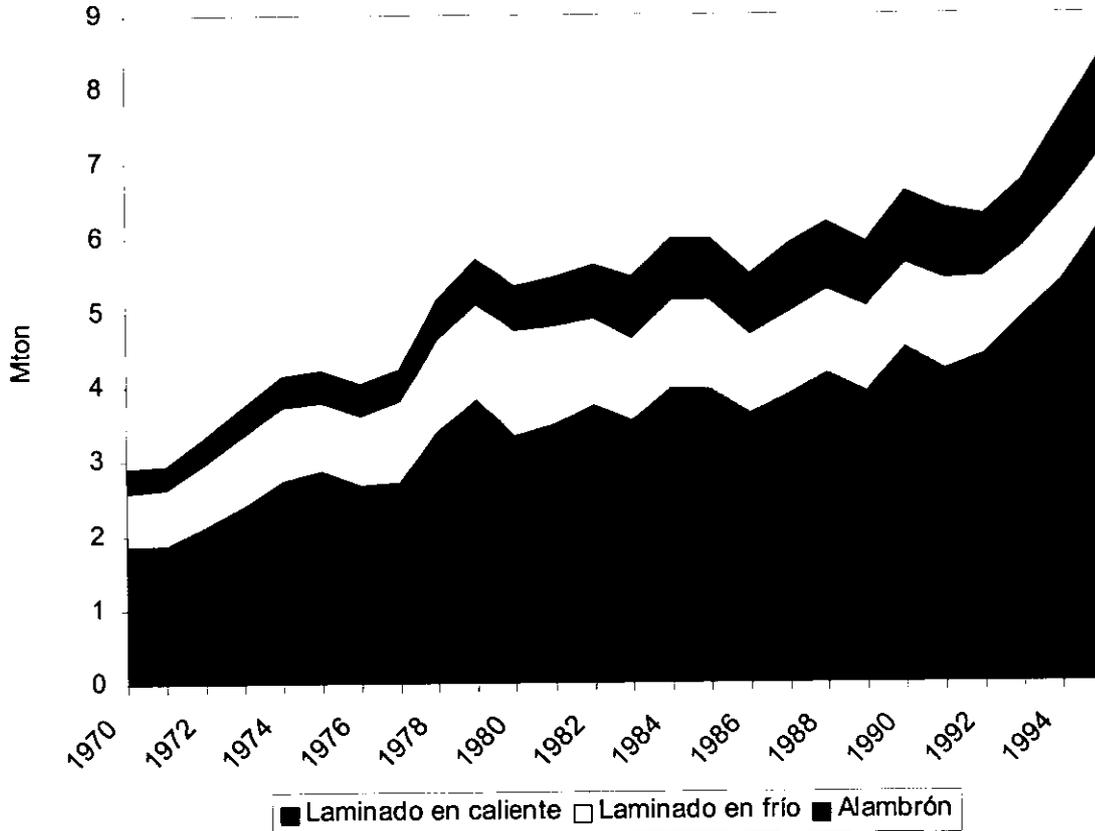
**Figura 3.13 Participación de la colada continua y colada en lingotes en la producción de acero de la industria siderúrgica mexicana 1970-1995**

**Tabla 3. 4 Colada continua y en lingotes en la industria siderúrgica mexicana**

	1970	1975	1980	1985	1990	1995
<b>Colado continuo</b>						
Producción [Mton]	0.4	0.7	2.1	3.8	5.5	9.6
[%]	9.8	13.3	29.3	51.1	63.6	79.8
<b>Colado en lingotes</b>						
Producción [Mton]	3.5	4.6	5.1	3.6	3.1	2.4
[%]	90.2	86.7	70.7	48.9	36.4	20.2

Fuente: IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48.

Finalmente los planchones y los perfiles son laminados en caliente o en frío dependiendo del producto final que se desee manufacturar. Se observa en la tabla 3.5 que la fabricación de los productos laminados en caliente se incrementó del 62.6% en 1970 al 72.4% en 1995, mientras que los productos laminados en frío disminuyeron del 24.8% en 1970 al 11.6% en 1995 debido a la introducción de la laminación en caliente de planchones delgados, lo que ha permitido fabricar ciertos productos que anteriormente provenían de la laminación en frío.<sup>127</sup>



Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, varios años, *Steel Statistical Yearbook*; IISI, varios años, *Steel Statistics of Developing Countries*

**Figura 3.14 Producción del laminados en caliente, laminados en frío y alambres de la industria siderúrgica mexicana 1970-1995**

<sup>127</sup> Quintero, R., 1997, "Perspectivas de la automatización en la industria siderúrgica", en el Congreso Latinoamericano de Siderurgia ILAFA - 38, p. 27-30

**Tabla 3. 5 Productos laminados en la industria siderúrgica mexicana [Mton]**

	1970	1975	1980	1985	1990	1995
Laminados en caliente <sup>128</sup>						
Producción[Mton]	1.86	2.85	3.32	3.94	4.49	6.15
[%]	62.6	65.8	55.6	64.9	68.1	72.4
Laminados en frío <sup>129</sup>						
Producción[Mton]	0.73	0.95	1.43	1.23	1.16	0.99
[%]	24.8	21.9	24.0	20.2	17.5	11.6
Alambrón						
Producción[Mton]	0.32	0.42	0.60	0.81	0.95	1.27
[%]	10.7	9.7	10.0	13.4	14.4	15.0
Otros						
Producción[Mton]	0.06	0.11	0.62	0.09	0.00	0.08
[%]	2.0	2.7	10.4	1.5	0.0	1.0
<b>PRODUCCIÓN TOTAL</b>	<b>2.97</b>	<b>4.33</b>	<b>5.97</b>	<b>6.07</b>	<b>6.60</b>	<b>8.49</b>

Fuente: INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

El consumo de energía y los combustibles empleados en la industria siderúrgica pueden explicarse a través de los procesos de fabricación utilizados. El coque y el gas natural son las principales fuentes energéticas de esta industria y se usan fundamentalmente como combustibles y como agentes reductores en la transformación del mineral de hierro en arrabio y en HRD; su consumo ha crecido de manera proporcional a la producción de éstos. El combustóleo, y en algunos casos el gas natural, es consumido para el calentamiento y como auxiliar para la combustión en el CBO o en el HEA. Finalmente, la electricidad es empleada principalmente en el HEA, aunque también en las etapas de rolado y en la producción de oxígeno para el CBO. Su consumo ha aumentado también proporcionalmente al empleo del HEA.

En el BNE no se reporta el consumo de los gases de coquería (GC), ni los gases de alto horno (GAH), sin embargo, PEMEX<sup>130</sup> y el Programa Universitario de Energía (PUE)<sup>131</sup> realizaron encuestas en empresas integradas para conocer el empleo de estos gases en la industria siderúrgica mexicana. De acuerdo con Elizalde, el consumo de estos gases en las empresas integradas ha disminuido, en 1994 representó el 14.2% del consumo energético total de estas empresas mientras que en 1988, éste representó el 18.6%.<sup>132</sup> En algunos casos, estos gases se han utilizado junto con gas natural para generar electricidad desde 1982,<sup>133</sup> aunque se desconoce en que proporción. A partir de 1992, el BNE reporta la electricidad producida en la industria siderúrgica, la cuál se ha incrementado en un 51% de 3.4 PJ en 1991 a 5.1 PJ en 1995. En este último año, el 16.9% de la electricidad consumida en la industria siderúrgica fue autogenerada, mientras que el 83.1% fue comprada.

<sup>128</sup> Se consideraron laminados en caliente los siguientes productos: lámina, plancha, varilla corrugada, perfil comercial (menor a 80 mm), perfil estructural (mayor a 80 mm), barras macizas y tubos sin costura.

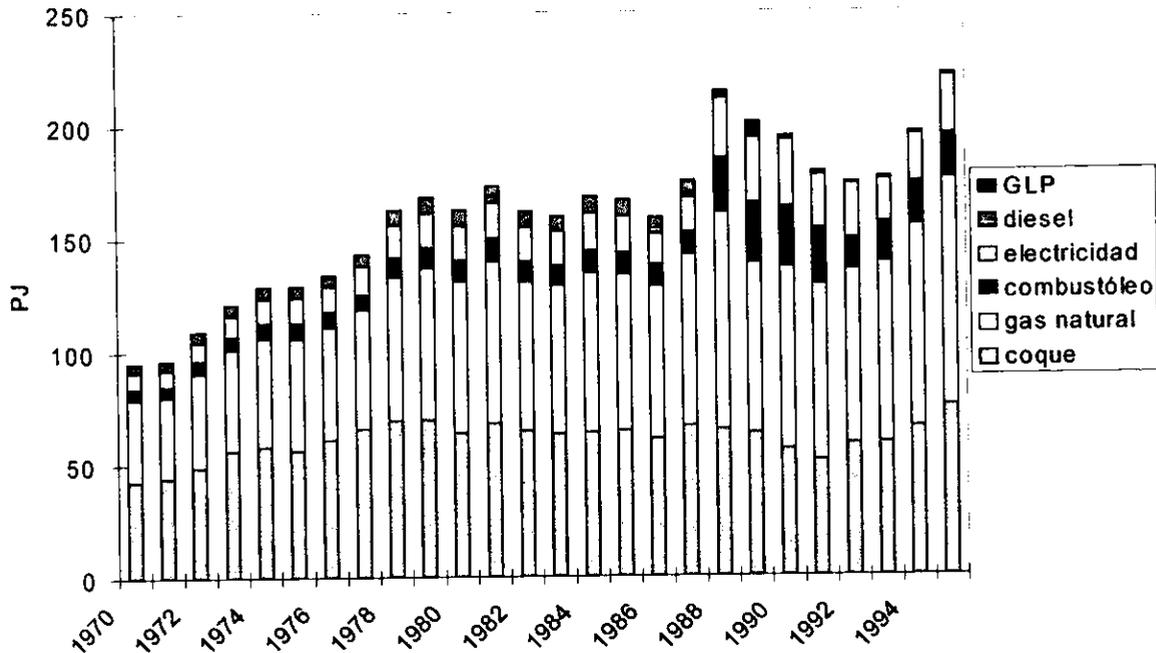
<sup>129</sup> Los productos laminados en frío son principalmente placas ultradelgadas y hojalata.

<sup>130</sup> Pemex, 1985, *Consumo de energía en la Industria Siderúrgica, Perfiles energéticos industriales no. 2*, PEMEX, Coordinación de Estudios Económicos, abril, p. 362-365.

<sup>131</sup> Elizalde, et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 27

<sup>132</sup> Elizalde, et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 27

<sup>133</sup> Pemex, 1985, *Op. cit.*, p. 362



Fuente: SE, 1997, Balance Nacional de Energía 1996, México, D.F., p. 66

**Figura 3.15 Consumo final de energía por fuentes de la industria siderúrgica mexicana 1970-1995**

### 3.4 Consumo específico de energía y emisiones de carbono de la industria siderúrgica en México

Entre 1970 y 1995, el consumo específico primario de energía de la industria siderúrgica mexicana disminuyó en un 26%, de 31.3 a 23.2 GJ<sub>p</sub>/tonelada de acero crudo. Por otra parte, las emisiones específicas de carbono se redujeron en un 21%, de 545 a 432 kg. de C por tonelada de acero crudo.

Para comprender los factores que influyeron en la disminución del consumo específico de energía y en la reducción de las emisiones específicas de carbono en la industria siderúrgica mexicana se emplearon las metodologías del análisis de descomposición y de estructura – eficiencia explicadas en el capítulo 1 y se calculó que el potencial de ahorro de energía respecto a la mejor práctica en 1995.

#### 3.4.1 Análisis de descomposición

Para el análisis de descomposición se empleó la técnica aditiva del análisis de intensidad energética descrita por las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12, pero tomando en cuenta los cambios en la composición de la producción de esta industria a lo largo del tiempo a través del índice de

producción física y los factores de ponderación mencionados en la tabla 1.2. Además se estimaron los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base debido a la disponibilidad de datos y al pequeño residuo resultante.

La influencia de los cambios en la eficiencia y en la estructura sobre el consumo específico de energía de la industria siderúrgica mexicana se presenta en la tabla 3.6. Los resultados muestran que si la eficiencia energética se hubiera mantenido constante a los niveles de 1970, el CEE<sub>p</sub> hubiera disminuido 0.3 GJ/ton de acero. Sin embargo, si los cambios estructurales se hubieran mantenido constantes, el CEE<sub>p</sub> hubiera disminuido en 7.8 GJ/ton de acero. La disminución del CEE<sub>p</sub> debido a mejoras en la eficiencia energética se relacionó principalmente a los siguientes cambios tecnológicos: la completa sustitución de los HHA por los CBO, el rápido crecimiento de la colada continua, un incremento en el empleo de los GHC y GHA para la cogeneración en las plantas integradas y a mejoras tecnológicas implementadas en la producción del HRD donde se han sustituido en varias plantas el proceso por lotes HYLI por el proceso continuo HYLIII y se ha instalado un sistema neumático que emplea gases de desecho de los reactores HRD para transportar el HRD caliente a los HEA, eliminando etapas de enfriamiento y recalentamiento.<sup>134</sup>

Los cambios estructurales que influyeron en la disminución del CEE<sub>p</sub> se debieron principalmente a un incremento en el empleo de la chatarra en la fabricación del acero y a modificaciones en la composición de productos finales. Desde el punto de vista de la composición de la producción, se ha incrementado la fabricación de productos finales laminados en caliente, principalmente planchas ultradelgadas (120 mm) que anteriormente eran obtenidas en el laminado en frío.

**Tabla 3. 6 Cambios en el consumo específico de energía de la industria siderúrgica mexicana entre 1970 y 1995**

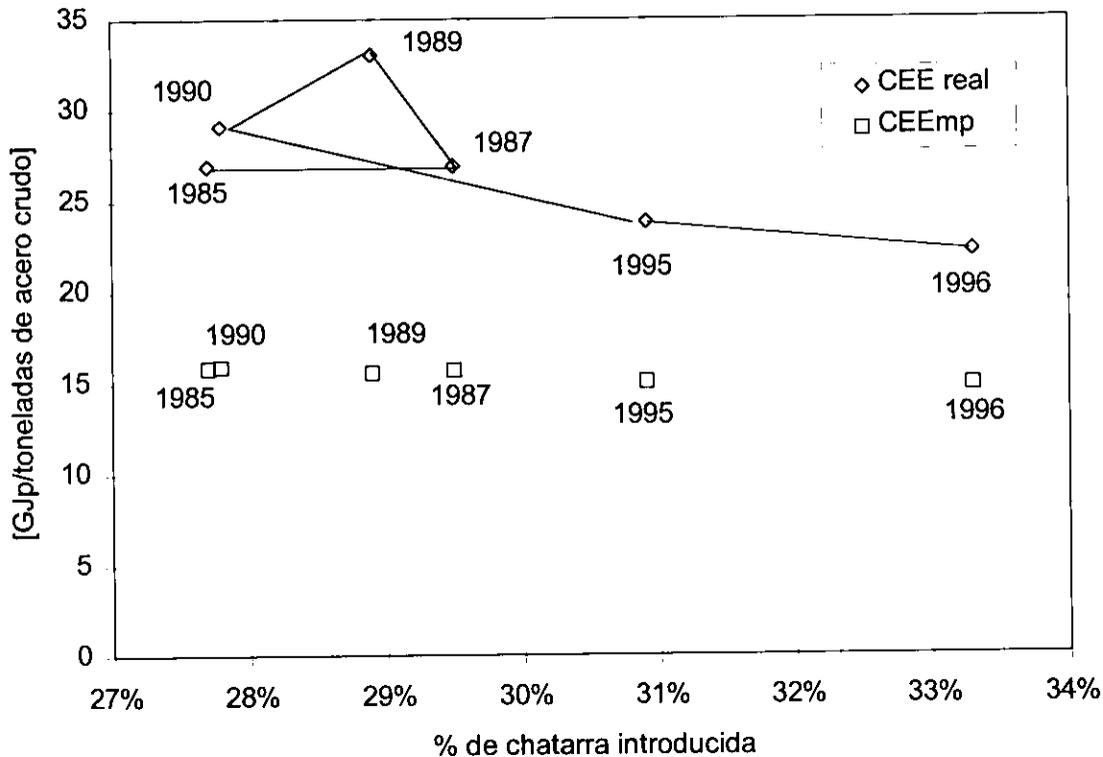
Periodo	CEE <sub>p</sub> (1970) [GJ/ton]	Estructura [GJ/ton]	Eficiencia [GJ/ton]	CEE <sub>p</sub> (1995) [GJ/ton]
1970-1995	31.3	-0.3	-7.8	23.2

Fuente: Elaboración propia con datos del SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F., INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statstics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

### 3.4.2 Análisis de estructura - eficiencia

Para analizar de manera complementaria los cambios en el CEE<sub>p</sub> usando el método del análisis de estructura - eficiencia se comparó el CEE<sub>p</sub> actual con el CEE<sub>p</sub> de la "mejor práctica" de la industria siderúrgica mexicana de 1985 a 1996 debido a la disponibilidad de los datos de consumo de chatarra (ver figura 3.16). Durante este periodo, tanto las innovaciones tecnológicas como los cambios en los procesos empleados y los productos finales fabricados condujeron a una importante disminución del CEE<sub>p</sub>.

<sup>134</sup> Quintero, R., 1995, *Op. cit.*, p. 11.



Fuente: Elaboración propia con datos del SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F., INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.

**Figura 3.16 Comparación de el CEE actual y el de la "mejor práctica" para la industria siderúrgica mexicana de 1985-1996**

Como se mencionó anteriormente, las mejoras en la eficiencia energética son: el cierre de la capacidad instalada de los HHA en 1992, los cambios tecnológicos en la producción del HRD, el aumento de la participación de la colada continua (51.1% en 1985 a 79.8% en 1995) y el incremento del empleo de los gases de coquería y de alto horno para la cogeneración en las plantas integradas. Además, la capacidad instalada se incrementó tanto en plantas integradas como semi integradas a través de la modernización de los equipos de proceso existentes y de la construcción de nuevas plantas con mejor tecnología.<sup>135</sup>

Por otra parte, dentro de los cambios estructurales se tiene que de 1985 a 1996 el consumo específico de chatarra aumentó de 0.27 a 0.3 ton de chatarra/ton de acero crudo, la producción en los HEA creció rápidamente y la fabricación de productos laminados en frío disminuyó debido a la laminación en caliente de planchones delgados y ultradelgados que han ido

<sup>135</sup> HYLSA, 1998, "HYL plants and projects in review" in HYL report, the Direct Reduction Quarterly, vol. 12, no. 1, p. 4-6

sustituyendo líneas de productos que anteriormente eran exclusivas del proceso de laminado en frío. Se observa que la cantidad de chatarra introducida en el proceso de fabricación del acero se ha incrementado ligeramente en comparación con el crecimiento de la producción en el HEA, esto se debe a que en México se emplea una mayor cantidad de HRD que de chatarra en estos hornos.

Comparando el CEE<sub>p</sub> real (23.8 GJ<sub>p</sub>/ton de acero crudo) con el CEE<sub>p</sub> de la "mejor práctica" (14.7 GJ<sub>p</sub>/ton de acero crudo) se estimó que el potencial técnico de ahorro de energía en la industria siderúrgica mexicana para 1995 fue del 35%.

### 3.4.3 Emisiones de carbono

Las emisiones de carbono en la industria siderúrgica mexicana han aumentado en un 148% de 1970 a 1995, esto es de 2.1 a 5.2 millones de toneladas de carbono. Este incremento se debe principalmente al uso de combustibles fósiles y de electricidad para la fabricación del acero. Es evidente que el factor que más influye en el incremento de las emisiones así como en el consumo de energía es el notable crecimiento de la producción de acero en estos años.

Sin embargo, se observa que durante el mismo periodo las emisiones específicas de carbono disminuyeron de 545 a 432 kg de C / ton de acero crudo, es decir, en un 21%.

Se empleó la metodología del análisis de descomposición (AVE-PDM2) para analizar el efecto de los cambios estructurales, de las mejoras en la eficiencia energética, de la sustitución de combustibles tanto en esta industria como en la generación de electricidad, en la disminución de las emisiones específicas de carbono. Estos efectos se presentan en la tabla 3.7.

**Tabla 3. 7 Efectos de los cambios de las diferentes variables que influyen en las emisiones específicas de carbono en la industria siderúrgica mexicana**

	Cambios 1970-1995 [kg de C/ton de acero crudo]
Emisiones específicas	-112.3
Estructura (IFP/P)	29.7
Eficiencia energética (E/IFP)	-185.9
Factores de emisión de carbono (FEC/E <sub>p</sub> /E)	43.8

Fuente: Elaboración propia con datos del SE, 1997, *Balace Nacional de Energía 1996*, México, D.F., INEGI, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IISI, 1997, *Steel Statistics of Developing Countries*, p. 47-48; SPP, varios años, *La industria siderúrgica en México*, México, D.F.; IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook*, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, p. 1.6

De 1970 a 1995, el mejoramiento de la eficiencia energética es el factor más importante que contribuyó a la reducción de las emisiones específicas de la industria siderúrgica.

En el periodo analizado, a pesar de la paulatina sustitución del coque por gas natural al incrementarse la fabricación de acero por la ruta HRD-HEA y en las plantas semiintegradas, el efecto de los factores de emisión no contribuyó a la reducción de las emisiones específicas debido

al crecimiento de la participación de la electricidad en la mezcla de combustibles de la industria siderúrgica y a un incremento del factor de emisión de la electricidad. El aumento de este factor se debió a que en 1970, el 57% de la generación eléctrica fue producida en plantas hidroeléctricas, las cuáles no emiten bióxido de carbono a la atmósfera; mientras que en 1995 sólo un 29% es producida en plantas que emplean fuentes renovables o que no generan emisiones como son las hidroeléctricas, las geotérmicas, la eolétrica y la nuclear, y el resto de la electricidad es producida en plantas termoeléctricas; aunque hay que considerar el mayor empleo de gas natural en los últimos años.

### 3.5 Comparaciones internacionales

En 1995, la industria siderúrgica mexicana produjo 12.1 millones de toneladas (Mton) de acero crudo, lo que representó el 1.6% de la producción mundial, ocupando el décimo sexto lugar en el mundo.

Para comparar y entender las tendencias de esta industria en el contexto mundial, se seleccionaron con base en la disponibilidad de datos, cinco de los principales productores mundiales de acero: Japón, Estados Unidos, Alemania, Brasil y Francia.

Tabla 3. 8 Producción de acero de los 20 principales productores de acero mundiales en 1995

País	Producción [Mton de acero crudo]	Participación en la producción mundial [%]
Japón	101.6	13.5
China	95.4	12.7
Estados Unidos	95.2	12.6
Rusia	51.6	6.9
Alemania	42.1	5.6
Corea del Sur	36.8	4.9
Italia	27.8	3.7
Brasil	25.1	3.3
Ucrania	22.3	3.0
India	22.0	2.9
Francia	18.1	2.4
Reino Unido	17.6	2.3
Canadá	14.4	1.9
España	13.8	1.8
Turquía	12.7	1.7
México	12.1	1.6
Polonia	11.9	1.6
Taiwan	11.6	1.5
Bélgica	11.6	1.5
Sudáfrica	8.7	1.2
TOTAL mundial	752.4	

Fuente: IISI, 1999, Steel Statistical Yearbook 1999, 'Largest steel producing countries 1992 to 1998', International Iron and Steel Institute web site: [http://www.worldsteel.org/trends\\_indicators/](http://www.worldsteel.org/trends_indicators/).

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

A continuación se presenta en la tabla 3.9 las principales características de la producción de acero en los países analizados.

**Tabla 3. 9 Producción de arrabio y acero crudo. Participación de los principales procesos de fabricación de acero en los países seleccionados para 1990.**

	Arrabio [Mton]	Acero crudo [Mton]	Porcentaje de CBO [%]	Porcentaje de HHA [%]	Porcentaje de HEA [%]	Porcentaje de chatarra [%]
Japón	80.2	110.3	69	0	31	33
Francia	14.4	19.0	72	0	28	33
Alemania	30.1	38.4	82	0	18	29
Estados Unidos	50.1	89.7	59	4	37	56
Brasil	21.1	20.6	74	2	24	23
<b>México</b>	<b>3.7</b>	<b>8.7</b>	<b>40</b>	<b>8</b>	<b>52</b>	<b>28</b>

Fuente: IISI, 1996; Worrell, et. al. 1997, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 727-744, INEDIS.

Con la información disponible se calculó el CEE agregado de 1990 y el CEE de la mejor práctica con datos de 1990 para Japón, Francia, Alemania<sup>136</sup>, Estados Unidos, Brasil y México que se presentan en la tabla 3.10 y la figura 3.17.

**Tabla 3. 10 Consumo específico de energía para la industria siderúrgica de los países analizados para 1990 [GJ<sub>p</sub>/ton de acero crudo]**

	CEE (1990) [GJ <sub>p</sub> /ton acero crudo]
Japón	19.2
Francia	24.2
Alemania	21.4
Estados Unidos	23.4
Brasil	26.5
<b>México</b>	<b>29.1</b>

Fuente: Cálculos elaborados con base en información de INEDIS del Laboratorio Lawrence Berkeley

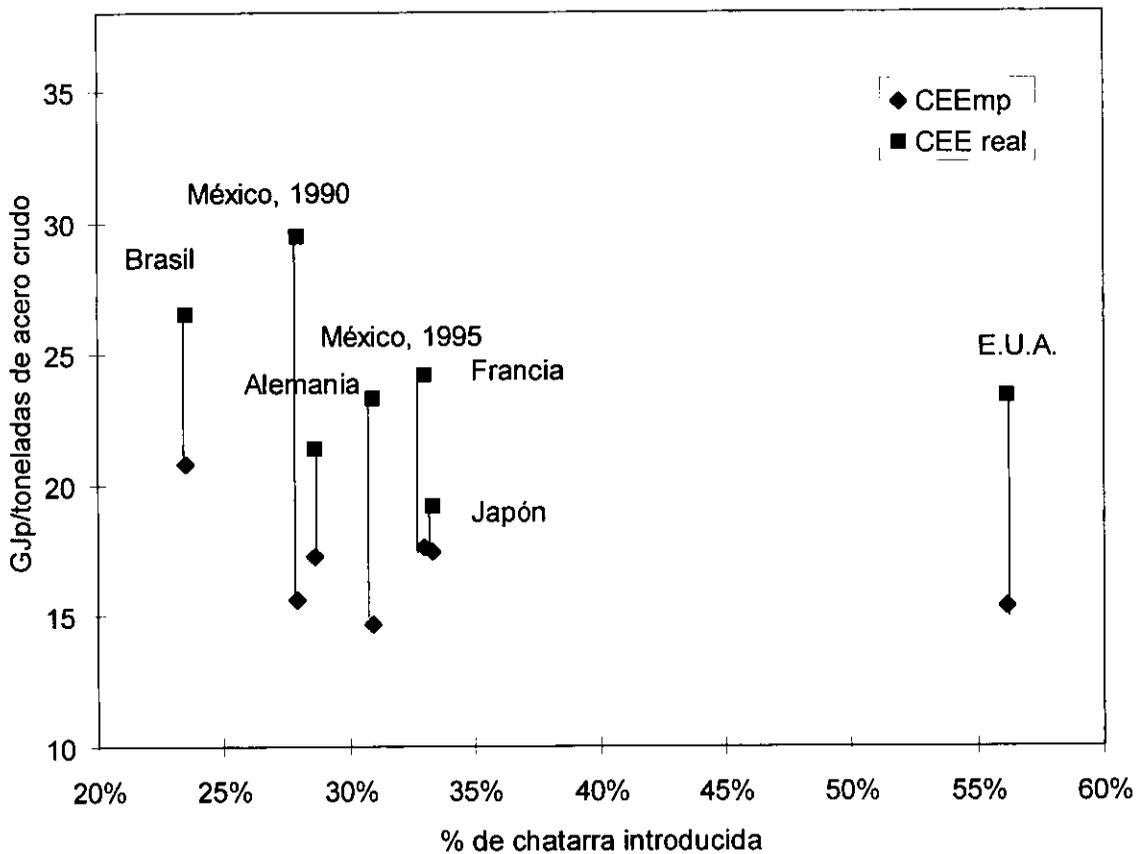
Es importante mencionar que la mayor parte de la chatarra es producida, consumida y comercializada por los países industrializados. En 1995 Estados Unidos, Japón y Europa Occidental consumieron 200 millones de toneladas de chatarra, lo que representó cerca del 50% del consumo mundial.<sup>137</sup> México, a diferencia de estos países, produce una gran cantidad de HRD que es introducido en el HEA en lugar de la chatarra.

Los países con menor CEE son Alemania, Japón y Francia. Las industrias siderúrgicas de estos tres países coinciden en que a principios de los ochentas cerraron sus obsoletas plantas de HHA y permitieron la rápida penetración de la tecnología de colada continua. El bajo CEE de Alemania se debe notablemente a la implantación de medidas específicas de eficiencia energética

<sup>136</sup> En 1990, Alemania se refiere a la República Federal de Alemania.

<sup>137</sup> Mendoza, 1995, *Op. cit.*, p. 20

como son: la recuperación de los gases del CBO, el incremento en el uso de pélets para alimentar los AH, el crecimiento en la generación de electricidad a partir de los GAH y la recuperación del calor sensible en los gases de salida del HEA y en las plantas de sínter. En Alemania, la mayor parte de los HHA fueron sustituidos por los CBO, sin aumentar la participación de los HEA en la fabricación del acero, lo que derivó en un menor consumo de chatarra, sin embargo, esto no tuvo ningún efecto negativo en el CEE. El potencial de eficiencia energética de esta industria fue del 19% en 1990, sin embargo, este potencial aumentó a partir de la unificación de Alemania debido a que la tecnología siderúrgica empleada en Alemania Democrática era obsoleta y provocó que el CEE de este país se incrementara.<sup>138</sup>



Fuente: Elaboración propia con la base de datos para la industria siderúrgica de INEDIS

**Figura 3.17 Comparación internacional del CEE actual y de la "mejor práctica" para 1990**

Por otro lado, los efectos estructurales son las causas del bajo CEE en Japón, la industria siderúrgica japonesa importa grandes cantidades de arrabio y tiene una baja participación de

<sup>138</sup> Worrell, E., L. Price, Nathan Martin, Jacco Farla and Roberto Schaeffer, 1997b, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 743.

productos laminados en frío.<sup>139</sup> Para Japón, el potencial de eficiencia energética en 1990 fue del 9%.

En Francia, el empleo de la colada continua se ha incrementado así como la producción de acero secundario, sin embargo, como se observa en la tabla 3.9 gran parte del acero se fabrica en los convertidores básicos al oxígeno. En los últimos años, el consumo de chatarra en estos hornos ha disminuido lo que provocó un aumento en los requerimientos de arrabio. En 1990, el potencial de eficiencia energética en esta industria fue del 27%.

La característica distintiva de la industria siderúrgica estadounidense respecto a los demás países es el relativo alto porcentaje de chatarra para la fabricación de acero secundario en los HEA, la cuál tiene una fuerte participación en este país. Sin embargo, su CEE no es tan bajo debido a la lenta penetración de tecnologías más eficientes en la fabricación del hierro y del acero y en los procesos de colado.<sup>140</sup> El potencial de eficiencia energética en esta industria fue del 34%.

Una característica importante de la industria siderúrgica brasileña es su alta producción de arrabio, cuyo excedente se exporta. Al igual que México, el consumo de chatarra en los CBO no es muy amplio. Por otra parte, la participación de la producción de acero en HHA disminuyó hasta desaparecer completamente en 1988, mientras que la del CBO se ha incrementado. De acuerdo a la estructura característica de la industria siderúrgica brasileña, ésta tenía un potencial de eficiencia energética del 22% en 1990.

Finalmente la industria siderúrgica mexicana se distingue de las demás por su alta producción de HRD. En 1990, una pequeña cantidad de acero seguía siendo fabricaba en los HHA, sin embargo, la tecnología de colada continua sustituyó rápidamente la colada en lingotes. A partir de 1990, los CBO desplazaron completamente los HHA, se mejoraron los procesos de producción del HRD, la participación de la producción en HEA y la colada continua se incrementaron con una mayor tasa de crecimiento que en los años anteriores. En 1990, el potencial de eficiencia energética de la industria siderúrgica mexicana fue de 46%. Cabe mencionar que debido a las mejoras tecnológicas y a los cambios estructurales que se presentaron entre 1990 y 1995, el potencial de ahorro de energía se redujo en un 11%.

Lo óptimo para la industria siderúrgica mexicana sería mejorar la eficiencia tanto energética como del uso de los materiales. Sin embargo, en México no se pronostica que se incremente rápidamente el consumo de chatarra debido a la desventaja económica que representa su comercialización; así como a la desventaja técnica de que el acero secundario es de menor calidad debido a las impurezas de la chatarra, por lo que requiere de una refinación secundaria para eliminarlas. Por otro lado, México cuenta con tecnología propia para producir HRD y con recursos de gas natural.

---

<sup>139</sup> Worrell, et. al., 1997b, *Op. cit.*, p. 743

<sup>140</sup> Worrell, E. y C. Moore, 1997, *Op. cit.*, p. 1-4

### 3.6 Potencial de mejoramiento de eficiencia energética y medidas propuestas

De acuerdo con el Instituto Internacional del hierro y el acero (IISI, por sus siglas en inglés), la producción mundial de acero seguirá creciendo con una tasa anual del 1.8%; la producción en los CBO aumentará al mismo ritmo, mientras que se espera que la de los HEA crezca a una tasa anual del 4.8%, esta última dependerá de la disponibilidad de HRD, del arrabio frío y de la chatarra recuperada u obsoleta.<sup>141</sup> En cuanto a la composición de la producción, el interés de las principales empresas siderúrgicas se centrará en los aceros con características especiales que le den un mayor valor agregado.

Bajo esta perspectiva de crecimiento mundial de la producción de acero, se espera que la producción en México y América Latina aumente con una mayor tasa de crecimiento comparada con la de los países industrializados. Se pronostica que el consumo de acero se incremente en un 1.5% por cada punto porcentual de crecimiento del PIB.<sup>142</sup>

Ante este previsible crecimiento, es importante que la industria siderúrgica mexicana utilice de manera eficiente la energía y disminuya las pérdidas de materiales para reducir sus costos operativos y sus emisiones contaminantes así como los desechos sólidos y líquidos que se generan en su proceso de fabricación.

En estos últimos años se han desarrollado varias mejoras en la eficiencia energética de la industria siderúrgica mexicana, como se mencionó en los incisos anteriores. Sin embargo, se estimó que todavía existe un potencial técnico de ahorro de energía del 35%.

La siguiente tabla resume las medidas recomendadas en cada etapa del proceso descritas brevemente en el inciso 3.1.

**Tabla 3. 11 Medidas de ahorro de energía por etapas del proceso de fabricación del hierro y del acero**

Etapas	Medidas
Sinterización	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recuperación de calor en calderas para precalentar el aire de combustión (c)</li> </ul>
Peletización	<ul style="list-style-type: none"> <li>Empleo del calor de desecho en los secadores (c)</li> </ul>
Preparación de coque	<ul style="list-style-type: none"> <li>Apagado en seco del coque (c)</li> <li>Control computarizado de la combustión en las baterías (c)</li> <li>Regulación de velocidad en los colectores de polvo (e)</li> </ul>
Alto horno	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inyección de carbón pulverizado, combustóleo o gas natural (c)</li> <li>Empleo de los gases de tragante para generar electricidad (c), (e)</li> <li>Recuperación del calor sensible de la escoria (c)</li> </ul>

Se emplearon las abreviaturas (c) para las medidas de ahorro de combustible, (e) para las medidas de ahorro de electricidad, (m) para las medidas de ahorro de material

<sup>141</sup> Hattori, 1996, *Op. cit.*, p. 3

<sup>142</sup> ILAFA, 1997, "Nuevo siglo, el futuro de la empresa siderúrgica" en *Acero latinoamericano*, enero-febrero, no. 440, p. 13-21

**Tabla 3. 11 Continuación**

Etapas	Medidas
HRD (Proceso HYL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación del calor sensible de la corriente de gas reformado y gases de combustión del reformador para la generación de vapor (c)</li> <li>• Empleo de fuentes alternativas de gases reductores como el gas de coquería, el gas COREX, etc. (c)</li> <li>• Introducción del HRD caliente en el HEA a través de un sistema neumático (HYLTEMP) que emplea gases reductores de desecho (c)</li> </ul>
Convertidor básico al oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleo de los gases de desecho del CBO (c)</li> <li>• Recuperación del calor sensible de la escoria (c)</li> <li>• Uso de un sistema de almacenamiento de oxígeno (c)</li> <li>• Sistemas de control automatizado para optimizar la recolección del gas de CBO (c)</li> <li>• Controles variables de velocidad para bombas, ventiladores, etc. (e)</li> </ul>
Horno eléctrico de arco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleo de hornos de ultra alta potencia (UHP) (e)</li> <li>• Pre calentamiento de la chatarra empleando gases de desecho de otras etapas (e)</li> <li>• Inyección de carbón pulverizado (c)</li> <li>• Empleo de quemadores de oxígeno y combustible (c)</li> <li>• Separación de la refinación secundaria (e)</li> <li>• Uso de electrodos refrigerados con agua (m)</li> <li>• Empleo de hornos de corriente directa o de plasma (e)</li> <li>• Sistemas automatizados de control (e)</li> </ul>
Colada continua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colada continua próxima a la forma final (c), (m)</li> </ul>
Laminado en caliente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laminación directa en caliente (c)</li> <li>• Empleo de gases de desecho en los hornos de recalentamiento (c)</li> <li>• Mayor productividad de los molinos: laminación continua con soldadura (palanquillas) (e)</li> </ul>
Laminado en frío	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor productividad en los molinos (e)</li> </ul>
En todas las etapas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen mantenimiento (c), (e)</li> </ul>

Se emplearon las abreviaturas (c) para las medidas de ahorro de combustible, (e) para las medidas de ahorro de electricidad, (m) para las medidas de ahorro de material

Es importante mencionar que sólo se estimó el potencial técnico de ahorro de energía, sin embargo, para estimar el potencial económico de las medidas de eficiencia energética es necesario evaluar el equipo adicional que se requeriría para la implantación de cada medida, su costo de inversión y su vida útil, el ahorro de energía medido y con ello, realizar un análisis del costo de energía ahorrada, lo cuál estuvo fuera del alcance de los objetivos de la tesis y se espera analizar en trabajos futuros para la industria siderúrgica mexicana. Este tipo de análisis permite conocer las medidas que logran un mayor ahorro de energía o una mayor reducción de emisiones de carbono con el menor costo.

De acuerdo a un estudio realizado por Worrell, de Beer y Blok,<sup>143</sup> las medidas de eficiencia energética más recomendables por su mayor ahorro de energía a menores costos para una planta en Holanda son: el uso de sistemas de almacenamiento de oxígeno en el CBO, la conexión directa de la colada continua con el laminado en caliente, el buen mantenimiento, el empleo de una turbina de expansión para generar electricidad, la inyección de carbón pulverizado en el AH. Aunque no

<sup>143</sup> Worrell, 1996, *Op. cit.*, p. 60- 61.

necesariamente son las mejores para México, ya que hay que tomar en cuenta las diferencias en la producción y en la tecnología utilizada en el país.

Un aspecto muy importante tanto para la eficiencia energética como en la de los materiales es el empleo de la chatarra. En México, la producción de arrabio y, en mayor medida, la de HRD seguirán incrementándose; sin embargo, también se estima que el consumo de chatarra va a aumentar sobre todo en las plantas semiintegradas. Como se mencionó anteriormente, el consumo de ésta depende de su disponibilidad y de su precio, de la infraestructura que cuenten para procesarla, y de los incentivos políticos y fiscales que promuevan u obstaculicen su comercialización y empleo. Un cambio importante para el reciclaje de chatarra ha sido la modificación a la Ley del IVA para el reciclaje de desperdicios que se realizó el 1° de enero de 1999, que establece la "retención obligatoria del IVA" por parte del comprador, siempre y cuando sean personas morales.<sup>144</sup> Esto evitará una competencia desleal entre los recicladores que si pagan el IVA de los que no lo hacen, además se reducirán los costos operativos de los recicladores al no tener que pagar el IVA en la compra de la chatarra y podrán invertir esta cantidad en maquinaria.

Por otra parte, es importante aprovechar subproductos de esta industria como la escoria de alto horno que puede ser empleada como un aditivo en la fabricación de cementos mezclados lo que representa beneficios ambientales, energéticos y económicos tanto a la industria siderúrgica como a la industria cementera. Por ello, AHMSA y cementos APASCO están planeando conjuntamente la construcción de una planta de cemento que produzca cementos de escoria de alto horno en Monclova.<sup>145</sup>

Otro proyecto importante para la industria siderúrgica nacional es la construcción de una planta integrada en Salina Cruz, Oaxaca por GAN; en la cuál se planea producir 4.2 millones de toneladas de HRD, que serán transformados en dos millones de toneladas de planchón y dos millones de toneladas de lámina delgada.<sup>146</sup>

### 3.7 Conclusiones

La reducción en el consumo de energía por unidad de acero en la industria siderúrgica mexicana se debió principalmente a un cambio tecnológico que propició el aumento en la eficiencia energética en su conjunto, a cambios estructurales dentro de la propia industria y a un aumento en el uso de la chatarra. En particular, el cambio tecnológico se aprecia en la desaparición de los hornos de hogar abierto, el crecimiento de la participación de la colada

<sup>144</sup> Fernández, R., 1999, "Chatarra: la fuerza del acero", en *Canacero, Suplemento Especial*, 2ª edición, 11 de marzo de 1999, pp. 4.

<sup>145</sup> Anónimo, 1996, *Acero Siderurgia Latinoamericana*, no. 439, p. 34.

<sup>146</sup> Valera, R., 1998, "Una siderúrgica de cara al mar" en *Acero, North American Steel Journal*, vol. 4, no. 23, noviembre-diciembre, pp. 3-9

continúa, el mayor empleo de los GHC y GAC en la cogeneración y la implantación de innovaciones tecnológicas en las plantas de HRD. Los cambios estructurales que favorecieron esta disminución del CEE son el incremento del empleo de la chatarra y el aumento en la fabricación de productos laminados en caliente, principalmente planchas ultradelgadas que anteriormente eran obtenidos en la laminación en frío. A pesar de este esfuerzo de reducción en el consumo de energía, aún existe un potencial de mejoramiento de la eficiencia energética respecto a la mejor práctica reconocida internacionalmente.

En cuanto a la reducción en la intensidad de las emisiones de carbono, ésta se debió principalmente al mejoramiento de la eficiencia energética. Sin embargo, el incremento en el empleo de la electricidad y en el factor de emisión de carbono de esta fuente energética no contribuyeron a que esta reducción fuera menor.

En un trabajo futuro, sería conveniente estimar el potencial económico de la industria siderúrgica mexicana analizando las medidas de eficiencia energética recomendadas en esta tesis, evaluando el equipo adicional que se requeriría para la implantación de cada medida, su costo de inversión, su vida útil, el ahorro de energía medido; y con ello, realizar un análisis del costo de energía ahorrada y de la mitigación de los gases de efecto invernadero. Para ello, se requiere de una estrecha colaboración con los productores mexicanos de acero.

## Capítulo 4

### Industria del cemento

Este capítulo se integra de seis partes. En la primera parte se describen los procesos de fabricación del cemento. En la segunda, la historia, el desarrollo y la situación actual de la industria del cemento en México, así como la evolución de su capacidad instalada. En la siguiente parte, se explica el desarrollo de la producción de cemento en este país de 1970 a 1995 basado en la situación económica del país, la importancia que ha adquirido la fabricación y empleo de los cementos Portland puzolánicos; así como las variaciones de la mezcla de combustibles en la industria cementera nacional incluyendo el empleo de combustibles alternos a partir de llantas y aceites usados. En la cuarta parte, se explica el efecto de los cambios estructurales y de eficiencia energética que contribuyeron a la reducción del CEE<sub>p</sub> y de las emisiones específicas de carbono debidas al uso de combustibles fósiles de 1981 a 1995 empleando un análisis de descomposición y un análisis de estructura-eficiencia basados en la metodología de Comparaciones Internacionales. En la quinta parte, se comparó la eficiencia energética de las industrias del cemento de China, Japón, Estados Unidos, India, Corea del Sur, Alemania, México, Brasil y Canadá tomando en cuenta la estructura de cada país de acuerdo a la metodología de Comparaciones Internacionales y se estimó su potencial de ahorro de energía para 1994. Finalmente en la última parte se recomiendan algunas medidas de eficiencia energética para esta industria.

La industria del cemento es una de las más importantes para el crecimiento económico de un país no sólo porque el cemento es una materia prima clave para el desarrollo de infraestructura, también por su alto consumo de energía, su destacada contribución al valor agregado industrial y una elevada generación de emisiones de bióxido de carbono. En México, esta industria empleó el 7.2% del consumo final de energía del sector industrial en 1995, contribuyó con un 0.8% en el valor agregado industrial y produjo 5.02 millones de toneladas de carbono de las cuáles el 57% se debieron a la calcinación de las materias primas y el 43% al empleo de combustibles fósiles.

## 4.1 Descripción del proceso de fabricación

El proceso de manufactura del cemento se divide principalmente en dos etapas: la fabricación del clinker, la cuál es la etapa más intensiva en el uso de la energía, y la molienda. Dependiendo de las condiciones de humedad y de dureza de las materias primas se emplean básicamente dos procesos industriales para su fabricación: la vía húmeda y la vía seca, aunque pueden presentarse variaciones de éstos como son la semi húmeda y la semi seca. El proceso húmedo se emplea cuando la materia prima contiene una humedad entre un 24 y 28% o cuando ésta puede ser más fácilmente procesada como pasta, por lo que se le agrega agua en la etapa de preparación para el horno. En el proceso seco, la materia prima empleada contiene entre un 0.5 y un 7% de humedad, se tritura y pulveriza para introducirla en el horno. El contenido de humedad en el proceso semi húmedo es del 17 al 22% mientras que en el semi seco es del 11 al 14%.<sup>147</sup> En general, el proceso seco es más eficiente que el proceso húmedo, sin embargo, este último permite una mayor flexibilidad en la selección y manejo de las materias primas.

### 4.1.1 Preparación de la materia prima

Las principales materias primas empleadas en la fabricación del cemento son: la piedra caliza que proporciona los componentes calcáreos; la arcilla que proporciona los silicatos y los aluminatos; y el mineral de hierro que proporciona los óxidos de fierro.

La piedra caliza y la arcilla se encuentran generalmente en canteras al aire libre. La extracción de estos materiales se hace en forma de escalones o bancos descendentes. Primero, se hacen barrenos donde se introducen explosivos. Posteriormente, la explosión disgrega y fracciona los bloques de cantera en diversos tamaños, los cuáles son transportados a la planta en grandes camiones.

La preparación de la materia prima depende del proceso empleado. En el proceso seco, las grandes piedras de las canteras son trituradas primero en quebradores de quijada o rotatorios para disminuir su tamaño hasta unos 15 cm, y después en quebradoras de cono rotatorio o de martillo hasta reducirlos a unos 13 mm. Una vez que la caliza, la arcilla y los óxidos de fierro son triturados se dosifican de acuerdo al tipo de cemento que se produce y es enviado a los molinos de materias primas donde son pulverizados. En algunos casos, cuando la materia prima aún contiene humedad, ésta se introduce a una etapa de secado donde generalmente se aprovechan los gases de salida del horno o el aire recirculado del sistema de molienda absorbiendo del 40 al 100% de las emisiones de bióxido de azufre producidas en la combustión y en la oxidación de algunos componentes de las materias primas.

<sup>147</sup> Fog, M., K. Nadkarni, 1983, *Energy Efficiency and Fuel substitution in the Cement Industry with Emphasis on Developing Countries*, documento técnico del Banco Mundial, Banco Mundial, Washington, E.U.A., p. 50

El consumo específico promedio en el proceso seco para la trituración primaria es de 7.71 kWh/ton de cemento (0.03 GJ<sub>e</sub>/ton de cemento) y para la trituración secundaria es de 9.23 kWh/ton de cemento (0.03 GJ<sub>e</sub>/ton de cemento).<sup>148</sup>

Posteriormente, la pulverización de la materia prima se realiza en molinos de bolas o en molinos de rodillos. En los molinos de bolas, la pulverización se lleva a cabo en unos cilindros rotatorios, al chocar las bolas de acero con las paredes y entre sí fragmentan y mezclan el material contenido en ellos. En los molinos de rodillos, la compresión del material entre dos pistones planos fractura las partículas grandes mientras que las pequeñas se reducen por fricción. En éstos últimos, la materia prima generalmente es secada durante la pulverización empleando los gases de desecho del horno. Los tipos de molinos de rodillos más conocidos son el molino de rodillos de alta presión, el molino vertical y el molino horizontal (Horomill). La harina cruda que se obtiene de los molinos se envía a unos silos de homogenización donde se mezcla entre sí para obtener una composición más uniforme. Es importante mencionar que una composición óptima y homogénea así como una fineza adecuada de la harina cruda reducen la temperatura de combustión en la zona de clinkerización y permiten tener condiciones de operación estables en el horno.

En el proceso húmedo, la arcilla se introduce en un molino de rastrillos, donde se desmenuza y se mezcla con agua hasta producir una pasta con un 65% de humedad, la cuál es bombeada a un contenedor con agitadores y posteriormente se dosifica junto con la caliza triturada a los molinos de materia prima. Finalmente la pasta pasa de los molinos a unos tanques correctores y de éstos a unos mezcladores.

En el proceso semi húmedo, el contenido de humedad de la pasta se reduce hasta un 17% a través de filtros mecánicos formando pequeñas barras cilíndricas que son alimentadas a la siguiente etapa. En el proceso semi seco, a la harina cruda se le añade el agua necesaria para conseguir una mayor uniformidad en la mezcla de materia prima. Esto se realiza en discos rotatorios donde se obtienen pélets con un contenido de humedad entre el 11 y 14%.

Es importante mencionar que el consumo específico de esta etapa (térmico y eléctrico para cada uno de los procesos) depende de la molturabilidad del material, del tipo de molino empleado y del tamaño de entrada y de salida del material.

En la molienda materia prima se prefiere el empleo de los molinos de rodillos ya que tienen una mayor capacidad de secado, una mayor flexibilidad de la materia prima y un ahorro de electricidad respecto al molino de bolas (30% si se emplea un molino vertical o hasta un 50% si se utiliza un molino de rodillos de alta presión).<sup>149</sup>

---

<sup>148</sup> Holderbank, 1993. *Present and Future use of energy in the cement and concrete industries in Canada*, Ontario, Canadá, p.7.

**Tabla 4.1 Consumo específico de la etapa de preparación de la alimentación al horno**

	CEE <sub>e</sub> KWh/ton clinker
Proceso húmedo	32
Proceso semi húmedo	35.1
Proceso semi seco	34
Proceso seco	33

Fuente: COWI consult, 1993, *Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Final Report*, febrero, p.50.

Las medidas de eficiencia energética recomendadas para esta etapa se mencionan en el inciso 4.6.

#### 4.1.2 Fabricación del clinker

La calcinación y la clinkerización son las operaciones más importantes en la fabricación del cemento, durante estas etapas se dan las reacciones químicas que forman los compuestos constituyentes del cemento.

El 90% del peso del cemento son silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio, los cuáles son los responsables del desarrollo de las resistencias, de la variación de volumen, etc. El 10% restante está constituido por yeso, aditivos (puzolanas, cenizas volantes, escoria de alto horno), cal libre e impurezas (óxidos de magnesio; óxidos de sodio y de potasio también conocidos como álcalis).

**Tabla 4.2 Principales compuestos del cemento**

	Fórmula química	Nomenclatura común	mínimo	Contenido Promedio	Máximo
Silicato tricálcico (alita)	3 CaO· SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	45%	62%	75%
Silicato dicálcico (belita)	2 CaO· SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	5%	15%	35%
Aluminato tricálcico (aluminato)	3 CaO· Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	4%	11%	15%
Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)	4 CaO· Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	4%	8%	15%
Cal libre	CaO	CaO	0.1%	1%	5%
Óxido de magnesio	MgO	MgO	0.5%	1.5%	5%
Álcalis <sup>150</sup>		Álcalis	-	-	0.6%
Yeso	CaSO <sub>4</sub>	-	2%	-	5%
Pérdidas por calcinación			-	-	3%

Fuente: Aguilar, A., *Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo*, México, p. 18-22

<sup>149</sup> Anónimo, 1998, "Técnica de molienda para la fabricación de cemento – Desarrollo, estado actual y perspectivas", en *ZKG International*, no. 2, enero, p. 58.

<sup>150</sup> Los álcalis son componentes de potasio, sodio, azufre, cloro y otros materiales que se evaporan de la materia prima a la temperatura de calcinación, al enfriarse se condensan y ocasionan recirculaciones internas que pueden perjudicar la operación del horno formando capas indeseables. Por otro lado, si estos componentes se incorporan en grandes cantidades al clinker disminuyen su calidad ya que provocan la expansión y el agrietamiento del concreto.

Para que se lleven a cabo las reacciones químicas de estos compuestos que forman el cemento es necesario proveer de una mínima cantidad de energía al material. A continuación se presenta la temperatura que se requiere para dichas reacciones:

**Tabla 4.3 Temperatura a la que se llevan a cabo las principales reacciones químicas en la fabricación del clinker**

	Temperatura
<b>EVAPORACIÓN</b>	
1. Evaporación de la humedad de la materia prima	100°C
2. Eliminación del agua absorbida y combinada en los materiales arcillosos	550°C
<b>CALCINACIÓN</b>	
3. Calcinación, acción a través de la cuál la caliza y el carbonato de magnesio liberan bióxido de carbono dejando cal libre y óxido de magnesio. $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ El porcentaje de cal libre (CaO) es del 15 al 20%	805°C
4. Descomposición de la arcilla $arcilla \rightarrow SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O$	800 ~ 1300°C
5. Una vez finalizada la calcinación, comienza la formación de compuestos intermedios como la belita (C <sub>2</sub> S) y la ferrita (C <sub>2</sub> F)	
6. A partir de los 900°C, la temperatura se incrementa rápidamente	
<b>SINTERIZACIÓN (CLINKERIZACIÓN)</b>	
7. Comienza la fase líquida	1280 ~ 1450°C
8. Formación de una fusión compuesta por aluminato (C <sub>3</sub> A), belita (C <sub>2</sub> S) y ferrita (C <sub>2</sub> F). El porcentaje de cal libre se reduce a un 2%.	
9. La belita se combina con más cal libre y forma la alita (C <sub>3</sub> S), compuesto importante responsable de la resistencia del cemento	
10. Máxima temperatura alcanzada, donde el 20 ~ 30% de la mezcla es líquida	1450°C
11. El crudo comienza a aglutinarse formando nódulos de 3 a 20 mm de diámetro (clinker)	
<b>ENFRIAMIENTO</b>	
12. Solidificación de los compuestos parcialmente líquidos	1000°C

Fuente: Peray, K.E., 1972, *The Rotary Cement Kiln*, Chemical, Nueva York, p. 85, 142-144

Es recomendable un enfriamiento rápido, ya que esto mejora la molturabilidad y la calidad del clinker en cuanto a la resistencia mecánica, durabilidad química y estabilidad del volumen del cemento como producto final. Un enfriamiento lento podría ocasionar que la alita obtenida en la etapa de clinkerización reaccione con la mezcla y se forme nuevamente belita y cal, que a su vez son consumidas para la formación de aluminato tricálcico; reduciendo la cantidad de alita en el clinker y disminuyendo su resistencia mecánica.

Los equipos más ampliamente empleados para las etapas de evaporación, calcinación y clinkerización son los hornos rotatorios y los hornos verticales.

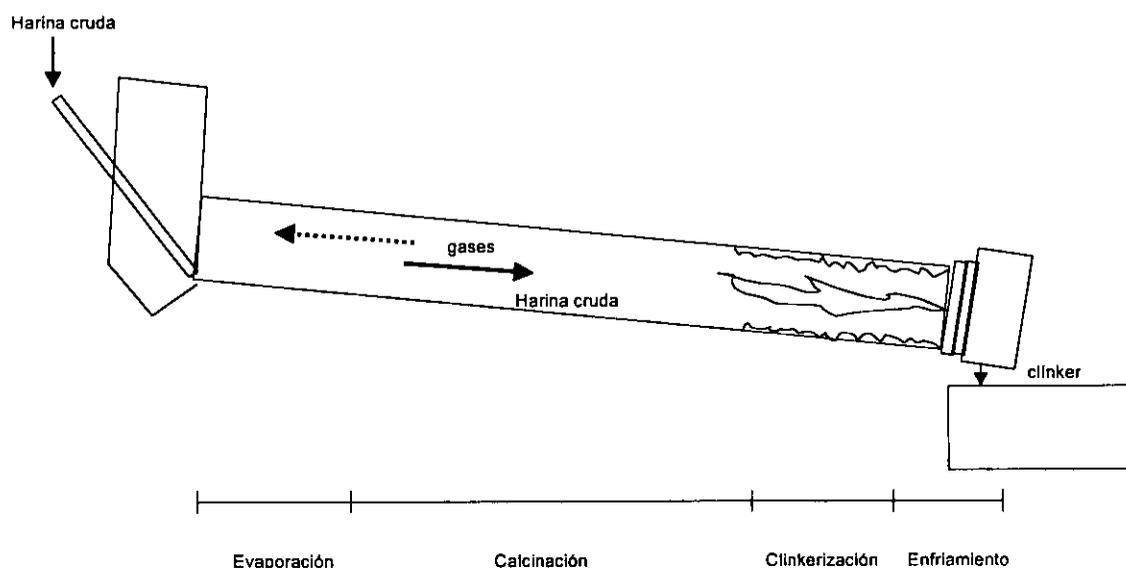
Los hornos verticales fueron los primeros hornos utilizados para la producción de cemento y tienen una capacidad limitada entre 20 y 200 toneladas de clinker al día. Su altura depende del tiempo necesario para que se lleven a cabo las reacciones químicas de cada etapa. La materia cruda se introduce en forma de pélets en la parte superior del horno. Su consumo de combustibles es bajo debido al principio de transferencia de calor directo que emplean, sin embargo, los hornos verticales fueron sustituidos por los hornos rotatorios ya que estos últimos tienen una mayor

productividad debido a su alta capacidad. En la actualidad, los hornos verticales han mejorado su eficiencia y se siguen utilizando en miniplantas, principalmente en China y en India para satisfacer mercados locales.

Los hornos rotatorios largos convencionales son cilindros de acero de 150 a 245 metros de longitud y 7 metros de diámetro, forrados de un material refractario, presentan una inclinación de 2° respecto a la horizontal y cuentan con rodillos y una corona conectada al engranaje de un motor que los hace girar a una velocidad aproximada de 2 a 3 revoluciones por minuto.<sup>151</sup> Su sistema de combustión primaria está constituido por un quemador que se instala en el extremo de descarga del horno. La naturaleza del combustible empleado condiciona la forma óptima en la que éste debe ser inyectado (granulometría, lugar, ángulo e impulsión) para mantener una flama estable y un recubrimiento uniforme en la zona de clinkerización.

En estos hornos el material crudo se introduce en la parte superior del horno y se desplaza lentamente hacia el extremo de descarga en contracorriente a los gases calientes producidos por la flama mientras el horno gira. A medida que el material avanza, su temperatura se eleva a los niveles requeridos para que ocurran las reacciones químicas necesarias. El tiempo de residencia del material en los hornos rotatorios largos es de 1 a 4 horas.

Los hornos de proceso húmedo generalmente cuentan con un sistema de cadenas en la entrada de la alimentación al horno para mejorar la transferencia de calor en la etapa de evaporación de humedad de la materia prima.



**Figura 4.1 Diagrama de un horno rotatorio largo de proceso seco**

<sup>151</sup> Aguilar, A., *Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo*. México, p. 18-22

Por otro lado, la etapa de calcinación es la que más requiere energía en el proceso por lo que los hornos rotatorios tanto de proceso seco como de proceso húmedo han sido equipados con precalentadores y/o precalcinaidores que permiten calcinar parcialmente la materia prima en un menor tiempo, lo que reduce su consumo específico de energía y aumenta su productividad. En un horno seco largo el material crudo debe desplazarse aproximadamente 45 m. en un lapso de tiempo de una hora para que se calcine en un 90%, mientras que en un horno con precalentadores y precalcinaidor este trabajo se realiza en aproximadamente dos minutos.

Los precalentadores tienen como función elevar la temperatura de la materia prima empleando el calor de los gases de salida del horno induciendo la calcinación de ésta de un 30 a un 40%. Para el proceso semi húmedo o semi seco generalmente se emplean los precalentadores de parrilla tipo Lepol; mientras que para el proceso seco se utilizan los precalentadores de suspensión. El precalentador de parrillas tipo Lepol consiste en una banda que transporta los pélets o las barras cilíndricas a través de un túnel que se desplaza en una cámara de baja temperatura donde se evapora la humedad de la materia prima; posteriormente pasa a una cámara de alta temperatura donde se calcina parcialmente hasta la entrada de alimentación del horno. Los gases del horno entran al precalentador a una temperatura aproximada de 1000°C y salen de éste entre unos 100°C y 120°C.<sup>152</sup> Una de las principales ventajas de este equipo es la reducción de álcalis y su baja emisión de polvo. El precalentador de suspensión cuenta con varias etapas de ciclones, generalmente son cuatro. La transferencia de calor en los ciclones es muy eficiente ya que la harina tiene un contacto directo e inmediato con los gases calientes, esto permite también que la harina absorba los óxidos de azufre y los incorpore en el clinker. En estos precalentadores, es conveniente que los ciclones tengan una baja caída de presión y una buena eficiencia de separación del polvo para tener un bajo consumo de energía y electricidad. A diferencia del precalentador de parrillas, se presentan ciclos de álcalis que tienen que ser removidos a través de sistemas de *bypass* lo que aumenta los requerimientos de energía térmica y eléctrica.<sup>153</sup>

El precalcinaidor puede ser un ciclón, un lecho fluidizado o un tubo largo con un sistema de combustión secundaria que se emplea junto con los precalentadores de suspensión. En el precalcinaidor, la materia prima se calcina parcialmente hasta un 90%. Al aumentar la alimentación de material próximamente calcinado al horno, las dimensiones de éste y su sistema de combustión primario pueden reducirse significativamente. Los hornos cortos tienen una relación longitud-diámetro de aproximadamente 11 a 1.<sup>154</sup> Las principales ventajas del uso de precalcinaidores y hornos cortos son: el aumento considerable en la productividad, una reducción en las emisiones de

<sup>152</sup> Schroth, G., 1975, *Energy Conservation Potential in the Cement Industry*, p. 249

<sup>153</sup> Los sistemas de *bypass* permiten remover las recirculaciones internas de componentes indeseados en el clinker, los sistemas más comunes son: *bypass* del gas, que se conecta en el punto de transición entre el horno y el precalentador; *bypass* de la harina cruda, este remueve una porción del flujo de alimentación al horno con compuestos condensados; y el *bypass* de polvo, este sistema elimina los compuestos a partir del filtro de polvo y puede interrumpir una recirculación externa.

<sup>154</sup> Andersen, K., 1975, "Kiln selection" en *Energy Conservation Potencial in Cement Industry Paper no. 26*, p. 194.

óxidos de nitrógeno al utilizar una combustión escalonada<sup>155</sup> y la posibilidad de emplear combustibles de bajo poder calorífico así como desechos debido a su sistema de combustión secundaria.<sup>156</sup>

Es importante mencionar que al empleo de sistemas con precalentadores y/o precalcinadores se consume una mayor cantidad de electricidad ya que se tienen mayores caídas de presión lo que hace que los ventiladores tengan un mayor consumo eléctrico, además de requerir de una mayor cantidad de recolectores de polvo.

Finalmente, después de la etapa de sinterización, el clínker es comúnmente enfriado en enfriadores de parrillas, enfriadores planetarios o en enfriadores rotatorios. En esta etapa, se recupera calor ya que el aire que enfría el clínker se emplea principalmente como aire secundario en el horno o se envía en un ducto de aire terciario hacia el precalcinador para auxiliar la combustión. El enfriador de parrillas es un intercambiador de calor de flujo cruzado donde se obtiene la rápida extinción de calor del clínker.<sup>157</sup> El tiempo de residencia del clínker dependerá de la velocidad de las parrillas, la altura de la cama de clínker y la velocidad de los ventiladores que fuerzan el flujo de aire por las parrillas. El enfriador planetario es un intercambiador de calor contracorriente, el cuál está formado por cilindros que se sujetan a la parte final del horno. Este enfriador no emplea partes móviles, ni ventiladores y todo el aire que pasa a través de los cilindros entra al horno. Una de las principales desventajas es que la temperatura de salida del clínker es mayor.<sup>158</sup> El enfriador rotatorio es un tubo similar al horno pero con su propio motor y utiliza agua para enfriar la carcaza o directamente el clínker.

El consumo específico teórico para la clinkerización es de 1804.6 kJ/kg clínker,<sup>159</sup> sin embargo, se deben tomar en cuenta las pérdidas por radiación, por convección, en los gases de salida y en el enfriador. En la tabla 4.4 se presenta la energía requerida para producir clínker en diferentes procesos que emplean el horno rotatorio.

Como se puede observar el empleo de hornos largos con proceso húmedo y con proceso seco es poco eficiente, ya que sus eficiencias son del 31 y 37% respectivamente, mientras que al emplear hornos de proceso seco con precalentadores, la eficiencia se incrementa al 50%. Si además el horno con precalentadores cuenta con un precalcinador su eficiencia aumenta al 57% debido a que existe una mejor transferencia de calor entre los gases calientes y el material.

---

<sup>155</sup> Conroy, G., 1994, "Modern Cement Plant Design with a view to efficiency and the environment", en las *Memorias de la Conferencia de IEEE 1994*, que se llevó a cabo del 30 de mayo al 2 de junio de 1994 en Washington, E.U.A., p. 370- 378.

<sup>156</sup> Rother, W., et. al., 1990, "Selection criteria for calciners" en *World Cement*, diciembre, p. 522-523

<sup>157</sup> Warshawsky, J., 1995, "Energy consideration in clinker cooling" en *Energy Conservation Potential in the Cement Industry Paper no. 26*, p. 180.

<sup>158</sup> Peray, K.E., 1972, *The Rotary Cement Kiln*, Chemical, Nueva York, p. 161-163

<sup>159</sup> Peray, K.E., 1979, *Op. cit.*, p. 107

Tabla 4.4 Energía requerida para la fabricación del clinker

	Proceso húmedo <sup>160</sup> [kJ/kg clinker]	Proceso seco con horno largo [kJ/kg clinker]	Proceso seco con precalentadores [kJ/kg clinker]	Proceso seco con precalentadores y precalcinador <sup>161</sup> [kJ/kg clinker]
Calor requerido para las reacciones químicas	1618.5	1659.7	1626.3	1766.5
Calor necesario para la evaporación de la humedad	2031.6	272.3	213.3	15.5
Pérdidas en los gases de salida y el polvo	692.3	1266.8	452.1	466.4
Pérdidas en el clinker	51.4	55.5	59.7	87.5
Pérdidas en el enfriador	172.3	536.2	556.8	467.3
Pérdidas por radiación y convección	732.4	740.5	321.1	239.9
<b>TOTAL</b>	<b>5298.3</b>	<b>4531.0</b>	<b>3229.3</b>	<b>3043.1</b>

Fuente: Peray, K.E., 1972, *The Rotary Cement Kiln*. Chemical, Nueva York, p. 109-111

Para reducir las pérdidas en los gases de salida se recomienda operar el horno con el nivel óptimo de oxígeno disminuyendo el exceso de aire en estos gases; emplear quemadores de alta velocidad, multicanal y de bajas emisiones de óxidos de nitrógeno que proporcionen la óptima temperatura y forma de la flama;<sup>162</sup> utilizar los gases de salida para el secado de materias primas; mejorar el intercambio de calor en los ciclones de los precalentadores y reducir en lo posible la desviación de gases o harina cruda en los sistemas de bypass.

Las pérdidas en el enfriador están relacionadas con el aire necesario para la combustión en el horno; mientras más eficiente es el horno, mayores son sus pérdidas en el enfriador. Sin embargo, el exceso de aire que no es utilizado en los hornos o en el precalcinador puede emplearse para secar materia prima o para precalentar los combustibles.

Para disminuir las pérdidas por radiación es aconsejable usar refractarios apropiados en la zona de clinkerización, así como recubrir con material aislante la carcasa del horno, los ductos del aire, las paredes del enfriador y de la torre de precalentamiento.

En general, es importante reducir las salidas de aire falso en el enfriador, en la entrada y en la salida del horno para mejorar la eficiencia de éste.

El CEE de la mejor práctica considera al sistema de un horno corto con una relación diámetro-longitud 11:1 que posee un sistema dual de precalentadores de 4 etapas, dos precalcinadores de bajas emisiones de óxidos de nitrógeno y un enfriador de parrillas de una

<sup>160</sup> Para el proceso húmedo, proceso seco con horno largo y proceso seco con precalentadores. Fuente: Peray, K.E., 1979, *Op. cit.*, p. 109-111.

<sup>161</sup> El sistema de precalentadores cuenta con 6 etapas de ciclones. Fuente: Seebach, M., et. al., 1994, "Designing a cement plant for the most stringent environmental standards" en la 36ª Conferencia de la IEEE realizada del 29 de mayo al 2 de junio de 1994 en Washington, E.U.A., p. 347

<sup>162</sup> Conroy, G.H., 1994, *Op. cit.*, p.381-383

planta localizada en Hualien, Taiwan y es de 3036 kJ/kg. clínker.<sup>163</sup> Es importante mencionar que se recupera calor en los gases de salida tanto de los precalentadores como del enfriador.

Por último, es importante mencionar que las características operativas de esta etapa del proceso como son: el corto tiempo de residencia de los gases, el tiempo de residencia de la harina cruda, el medio gaseoso turbulento, la atmósfera altamente oxidizante, las elevadas temperaturas en el horno, el alto nivel de dilución de ciertos elementos en el clínker y las bajas temperaturas de los gases de salida; permiten el empleo de llantas y aceites usados como combustible en el horno y en los precalcinadores sin generar residuos y emisiones adicionales.

### 4.1.3 Molienda del cemento

Esta etapa es muy importante en la fabricación del cemento ya que el tamaño de las partículas, su uniformidad, su superficie específica en  $\text{cm}^2/\text{g}$  (Blaine), así como la hidratación influyen en el desarrollo de las características mecánicas del cemento. La óptima distribución granulométrica del cemento es con una alta uniformidad, un bajo contenido de partículas muy finas y una superficie Blaine entre 2500 y 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

En el inciso 4.1.1 se describió el funcionamiento de los molinos de bolas y de rodillos que también se utilizan en esta etapa para la molienda del clínker y los aditivos. Actualmente, se emplean sistemas de molienda integral, los cuáles emplean molinos de rodillos de alta presión, verticales u horizontales para la molienda gruesa del clínker con el yeso y un molino de bolas para la molienda fina. Existen cuatro modos de operación: premolienda, molienda híbrida, molienda combinada y molienda final. La capacidad del molino de bolas es variable de acuerdo al modo de operación; al tener una operación más uniforme en el molino de rodillos se disminuye la carga en el molino de bolas, éste aumenta su capacidad y se incrementa el ahorro de energía.<sup>164</sup> El criterio de selección de los tipos de molinos empleados y la configuración de éstos dependerá de la cantidad y calidad del cemento que se desea producir así como del consumo de electricidad, de la superficie específica requerida y de los costos de inversión y mantenimiento.<sup>165</sup>

Comúnmente estos molinos han sido empleados en circuito abierto, sin embargo, se han instalado circuitos cerrados con clasificadores de alta eficiencia ya que éstos incrementan notablemente la productividad de la molienda, aumentan la resistencia del cemento y disminuyen su consumo específico de electricidad. Estos circuitos cerrados cuentan con un molino de rodillos de alta presión; un desaglomerador que generalmente es un triturador de impacto y un separador

<sup>163</sup> Chang, T., 1994, "Successful operation of the world's only 5000 tpd short rotary kiln" en *World Cement*, septiembre, Inglaterra, p. 9-11.

<sup>164</sup> Schwarz, S., et. al., 1990, "Grinding optimisation using high pressure grinding roll and downstream ball mills" en *World cement*, septiembre, p. 385.

<sup>165</sup> Anónimo, 1998, *Op. cit.*, p. 53-61.

de alta eficiencia que regresa las partículas gruesas al molino de rodillos, mientras que las partículas finas son enviadas a los molinos de bolas o forman parte del producto final.<sup>166</sup>

Una comparación del consumo específico de electricidad para pulverizar clínker con una superficie de 3000 a 3150 cm<sup>2</sup>/g (Blaine) en un molino de bolas convencional, en un sistema de molienda integral y en un molino de rodillos en circuito cerrado se muestra en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Consumo específico de electricidad en la molienda final [kWh/ton]**

Consumo específico de electricidad <sup>167</sup> (kWh)	Molino de bolas	Sistema de molienda integral	Molino de rodillos
de	33.5	24.1	18.8

Fuente: Seebach, M., et. al., "Designing a cement plant for the most Stringent Environmental Standards", en *Memorias del 36ª Conferencia de la IEEE* que se llevó a cabo del 29 de mayo al 2 de junio en Washington, E.U.A., p. 355

Si se producen cementos mezclados, es importante tomar en cuenta la molienda de puzolanas, cenizas volantes o escoria granulada de alto horno, la cuál se puede llevar a cabo junto con la molienda de clínker, en dos etapas o de manera separada de acuerdo a la situación individual de cada planta.<sup>168</sup>

El CEE eléctrico de la mejor práctica para toda una planta de cemento mexicana situada en Tepeaca, Puebla considerando desde la etapa de trituración hasta la de molienda final del cemento, es de 97 kWh/ton de cemento que equivale a 0.35 GJ<sub>e</sub>/ton de cemento. Cabe mencionar que en la molienda de materia prima se emplean molinos verticales, mientras que en la molienda de cemento utilizan molinos de bolas, ambos sistemas operan en circuito cerrado con clasificadores de alta eficiencia.<sup>169</sup>

#### 4.1.4 Equipo anticontaminante

En las plantas de cemento el mayor problema relacionado con el medio ambiente es la emisión de polvo.<sup>170</sup> Este polvo está integrado por materias primas no calcinadas, material parcialmente calcinado y clínker del cemento. Estas partículas son perjudiciales a la salud y al medio ambiente de acuerdo a su tamaño; las más finas dañan las vías respiratorias del ser humano, mientras que las gruesas afectan a las plantas y los alrededores. Las fuentes de emisión de estas partículas dentro del proceso de fabricación son: el polvo del horno y de los enfriadores

<sup>166</sup> Seebach, M., et. al., 1994, "Designing a cement plant for the most stringent environmental standards", en la 36ª Conferencia de la IEEE que se realizó del 29 de mayo al 2 de junio de 1994, en Washington, E.U.A., p. 336.

<sup>167</sup> Incluye el consumo de electricidad en los molinos, desaglomeradores, separadores, ventiladores y elevadores.

<sup>168</sup> Anónimo, 1998, *Op. cit.*, p. 59-61.

<sup>169</sup> Turley, W., 1995, *Op. cit.*, p. 24

<sup>170</sup> La norma mexicana que establece los niveles máximos de emisión de partículas en la industria del cemento es la NOM-040-ECOL-1993.

que son arrastrados por los gases de salida; y las llamadas emisiones fugitivas que son las partículas que se dispersan en la extracción de materias primas, en la trituración, en la molienda, en el transporte y en el almacenamiento del material (clínker y cemento).

Generalmente se emplean precipitadores electrostáticos o filtros de bolsas para el polvo proveniente del enfriador, del horno y de los molinos. En los filtros de bolsa, el polvo se deposita en un tejido que está suspendido verticalmente; mientras que en los precipitadores electrostáticos, los gases pasan a través de un intenso campo electromagnético en el cuál las partículas suspendidas en el gas se polarizan negativamente y son atraídas hacia el electrodo positivo donde se remueven a través de vibraciones frecuentes de corta duración.

Para el polvo de la trituración de materias primas y de las etapas de molienda se emplean ciclones centrífugos en circuitos cerrados los cuáles permiten reciclar el material grueso y separar el material fino.

El polvo recolectado que no puede ser reincorporado en el proceso de fabricación puede utilizarse como relleno de suelos, como endulzador de los mismos o como agente estabilizador para terrenos, si su contenido de metales no afecta el manto freático del subsuelo.

Por otro lado, la industria cementera emite al aire óxidos de nitrógeno y de azufre que se generan en el proceso de combustión. Los óxidos de nitrógeno se pueden reducir empleando quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  en los hornos,<sup>171</sup> sistemas de combustión escalonada en hornos con precalcinadores,<sup>172</sup> e introduciendo amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en el horno. En cuanto a los óxidos de azufre, una parte de éstos reaccionan con la cal libre en los precalentadores y en los precalcinadores formando sulfatos que se incorporan en el clínker. Para disminuir los óxidos de azufre se pueden utilizar los gases de desecho en el secado y la molienda de materia prima, emplear combustibles con menores contenidos de azufre, introducir aditivos como la caliza hidratada en el nivel de temperaturas donde se generan los óxidos de azufre e instalar plantas desulfuradoras.

## **4.2 Antecedentes históricos y situación actual de la industria del cemento en México**

La primera planta de cementos en México se construyó en el estado de Hidalgo con inversión exclusivamente extranjera en 1906. A partir de la década de los cuarentas la estabilidad política del país favoreció el crecimiento de la oferta cementera por lo que se construyeron nuevas fábricas en diversos lugares del país. En 1973, la industria cementera nacional contaba con 26 plantas y 73 hornos. A partir de este año hasta 1985, la capacidad instalada aumentó hasta 28

---

<sup>171</sup> Da Silva, J, et. al., 1993, "Emission and control of pollutants in the cement industry" en *Third International Conference on waste management in the chemical and petrochemical industries*, octubre, Brasil, p. 365

<sup>172</sup> Kreft, W., 1990, "Ecological aspects of cement – Environmentally oriented application of technology as a contribution to climatic protection", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 5, mayo, p. 123-127.

millones de toneladas anuales con un ritmo del 8% anual.<sup>173</sup> Durante este periodo, el gobierno promovió el desarrollo de esta industria al otorgarle precios preferenciales para los hidrocarburos y la electricidad; además, el crecimiento económico nacional favoreció el desarrollo de la construcción y por consiguiente a la industria del cemento

De 1982 a 1988, la demanda interna de cemento disminuyó drásticamente debido a la crisis económica del país; sin embargo, existía un exceso de la capacidad instalada construida en años anteriores, por lo que la industria cementera mexicana buscó nuevos mercados en el exterior principalmente en Estados Unidos, el Caribe y Centroamérica. En este periodo, las exportaciones se incrementaron notablemente a una tasa anual del 54.4%. No obstante, esta actividad se afectó seriamente cuando en 1990 los productores de cemento estadounidenses acusaron a la industria cementera mexicana de exportar el cemento a precios *dumping*, y el gobierno estadounidense impuso un impuesto compensatorio del 47.2% al cemento Portland y del 53.3% al clínker.<sup>174</sup> Es importante mencionar que, en general, los costos de producción de cemento en México eran menores que en Estados Unidos, debido a menores costos de capital y a menores impuestos; de acuerdo a Byland, el costo de producción de una planta de un millón de toneladas anuales en México era aproximadamente 8 dólares por tonelada menor que el de una planta en Texas.<sup>175</sup>

Por otro lado, la ligera recuperación de la economía mexicana a principios de la década de los noventas permitió la reactivación del mercado interno y un incremento continuo de la producción. Sin embargo, una nueva crisis económica a finales de 1994 provocó una fuerte reducción en el consumo interno del cemento y nuevamente aumentaron las exportaciones.

**Tabla 4.6 Producción y exportaciones de la industria del cemento en México 1982-1995 [miles de toneladas]**

Año	Producción [miles de toneladas]	Exportaciones [miles de toneladas]	Participación de las exportaciones en la producción nacional
1982	19298	345	1.8%
1983	17068	1097	6.4%
1984	18436	2007	10.9%
1985	20680	2413	11.7%
1986	19751	3964	20.1%
1987	22347	4569	20.4%
1988	22512	4530	20.1%
1989	23333	4158	17.8%
1990	23824	2594	10.9%
1991	25092	1500	6.0%
1992	26884	1266	4.7%
1993	27500	1100	4.0%
1994	29808	1000	3.3%
1995	24200	3400	14.0%

Fuentes.: Cembureau, 1997, "World cement market in figures 1913/1995" en *World Statistical Review no. 18/Special edition*. Bélgica, p. 157

<sup>173</sup> Salomón, A., 1995, "Industria del cemento: pruebas del tiempo", en *Comercio exterior*. México, D.F., p. 823-826.

<sup>174</sup> Salomón, A., 1995, *Op. cit.*, p. 823-826.

<sup>175</sup> Byland, P., 1993, "The North American cement industry: a foreign investor's perspective, developed and developing world economies", en *World cement*, junio, p. 11

En 1995, la industria del cemento en México estaba integrada por 31 plantas de cemento situadas estratégicamente para satisfacer tanto la demanda interna como la externa. Una fuerte concentración de plantas se localiza en el centro del país cerca de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), mientras que otro grupo de plantas se ubica cerca de la frontera con Estados Unidos o cerca de puertos con facilidades de transporte marítimo. La capacidad instalada de cemento en 1995 fue de 43.7 millones de toneladas anuales.

**Tabla 4.7 Capacidad instalada de cemento de los principales grupos industriales por proceso, 1995 [millones de toneladas]**

Grupo industrial	No. de plantas	Capacidad instalada (Vía húmeda) [millones de toneladas]	Capacidad instalada (Vía seca) [millones de toneladas]	Participación en la producción nacional [%]
Grupo CEMEX	17	-	27.66	63.3%
Grupo APASCO	6	-	7.78	17.8%
Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L.	2	-	4.77	10.9%
Cementos de Chihuahua, S.A. de C.V.	3	-	1.80	4.1%
Cementos Portland Moctezuma, S.A. de C.V.	2	0.40	0.90	3.0%
Cementos Portland Blanco de México, S.A. de C.V.	1	-	0.37	0.8%
<b>TOTAL</b>	<b>31</b>	<b>0.40</b>	<b>43.28</b>	<b>100%</b>

Fuente: CEMBUREAU, 1997, *World cement directory 1996*, Bruselas, Bélgica

En los últimos años, la capacidad instalada aumentó principalmente por la construcción de nuevas plantas con avanzada tecnología; además las plantas existentes también han ampliado su capacidad instalando con sistemas de precalentamiento y precalcación, sistemas automatizados del proceso de producción, sistemas de molienda más eficientes, equipos para el control de emisiones contaminantes y equipos especiales para el uso de combustibles alternos.<sup>176</sup>

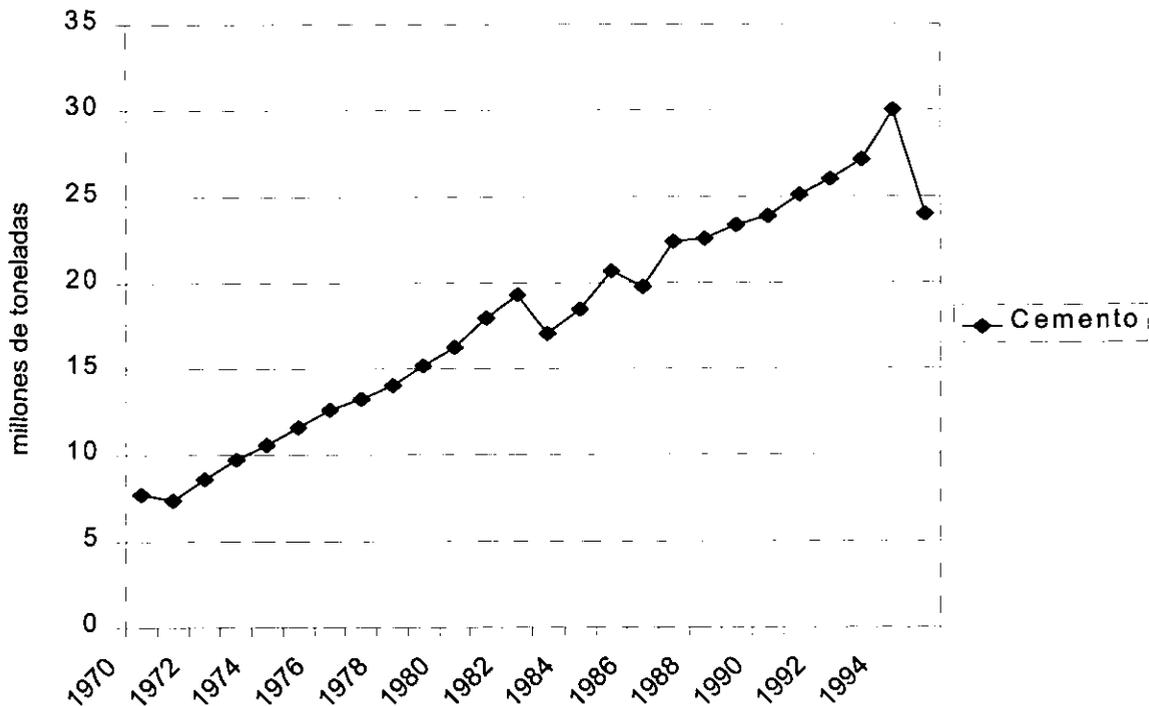
### 4.3 Perspectivas de la producción y consumo de energía en la industria del cemento en México

De acuerdo al Balance Nacional de Energía, la industria del cemento en México es la quinta industria más intensiva en el uso de la energía del sector industrial. En 1995 empleó el 7.2% del consumo final de este sector.<sup>177</sup>

De 1970 a 1995, la producción de cemento se incrementó notablemente a una tasa anual del 4.6%, y el consumo de energía primaria aumentó a una tasa del 3.9%. Sin embargo, el consumo específico de energía primaria se redujo de 5.6 a 4.7 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento debido a la introducción de mejoras tecnológicas en el proceso de fabricación y a la sustitución parcial del clinker por materiales con propiedades cementantes como son las puzolanas.

<sup>176</sup> CEMEX, 1994, *Informe Anual*. Anuario, México, D.F., p. 34-38; y APASCO, 1994, *Informe Anual*, México, D.F.

<sup>177</sup> SE, 1997, *Balance Nacional de energía 1996*, México, D.F., p. 66-72.



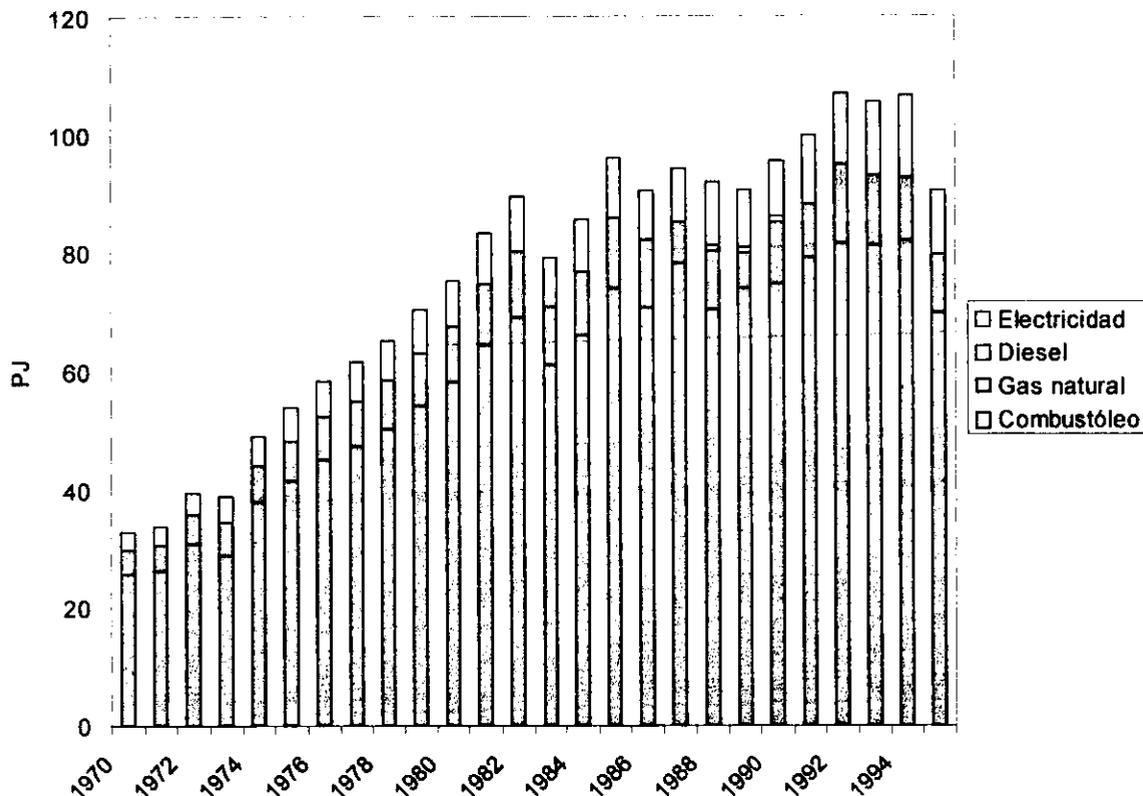
Fuente: Cembureau, 1997, "World cement market in figures 1913/1995" en *World Statistical Review no. 18/Special edition*, Bélgica, p. 157

**Figura 4.2 Producción de cemento en México, 1970-1995**

La industria del cemento está estrechamente relacionada con el desarrollo de la industria de la construcción y de la economía nacional. De 1970 a 1982, el incremento de la producción se debió principalmente a un fuerte desarrollo de infraestructura gracias al auge de las exportaciones petroleras. De 1982 a 1988, la demanda interna de cemento se redujo debido a una crisis económica; sin embargo, la producción de la industria cementera se dedicó a satisfacer mercados externos a través de exportaciones. A pesar de la disminución de las exportaciones debido a una demanda de *dumping* a partir de 1989, la producción de cemento continuó incrementándose al presentarse una recuperación en la economía nacional. Finalmente en 1995, la producción se redujo drásticamente debido a una nueva crisis económica.

En cuanto al uso de la energía en esta industria, en la figura 4.3 se muestran los principales combustibles empleados que son el combustóleo, el gas natural y la electricidad reportados por el BNE. De 1970 a 1995, la participación del combustóleo en la mezcla de combustibles no ha variado significativamente, la del gas natural ha disminuido ligeramente mientras que el empleo de la electricidad ha aumentado. Como se observa el principal combustible que se introduce en los sistemas de combustión del horno es el combustóleo y en menor medida, el gas natural. La electricidad se utiliza principalmente en los molinos de cemento y de materias primas, aunque también en los trituradores, los motores del horno, los elevadores y los

ventiladores. El diesel se consumió en pequeñas cantidades entre 1988 y 1990, el cuál era empleado en el transporte y para calentar el combustóleo dentro del proceso productivo.



Fuente: SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F., p. 66.

**Figura 4.3 Mezcla de combustibles en la Industria cementera mexicana**

De acuerdo a CEMBUREAU, de las 31 plantas mexicanas de cemento en 1995, 9 emplearon exclusivamente combustóleo como combustible primario; 6 usaron combustóleo o gas natural; 6 consumieron solo gas natural; 3 plantas reportaron el uso de combustóleo o coque; 2 emplearon combustóleo, gas natural o coque; 2 plantas utilizaron combustóleo, coque o combustibles alternos; una planta empleó combustóleo o carbón, otra planta usó combustóleo, gas natural o carbón; y finalmente una planta utilizó combustóleo o combustible alterno.<sup>178</sup> Posiblemente el consumo de coque, carbón y combustibles alternos es poco significativo por lo que no es reportado en el BNE. Sin embargo, es importante contabilizarlo ya que la sustitución parcial de los combustibles fósiles por residuos industriales es una opción para recuperar energía y destruir estos residuos de manera controlada.

El 90% de la energía térmica consumida es utilizada en la etapa de clinkerización; mientras que el 40% de la electricidad se emplea en la molienda de cemento, por esta razón las principales

<sup>178</sup> CEMBUREAU, 1997, *World Cement Directory 1996*, Bruselas, Bélgica.

medidas para reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono se han enfocado en estas etapas.

#### 4.3.1 Mejoras tecnológicas

De 1970 a 1995, se han llevado a cabo importantes cambios tecnológicos. Principalmente la sustitución de la capacidad instalada del proceso húmedo por el proceso seco; y el incremento y la modernización de esta capacidad instalada con sistemas de precalentadores, precalcinadores, sistemas integrales de molienda y sistemas automatizados para el control de los procesos. Como se muestra en la tabla 4.8, la capacidad instalada del proceso húmedo ha disminuido, mientras que la de los hornos con sistemas de precalentadores y precalcinador se ha incrementado notablemente.

**Tabla 4.8 Capacidad instalada para varios años de la industria cementera mexicana por proceso**

Proceso	1976	1981	1985	1993	1995
Hornos largos vía húmeda [millones de toneladas anuales]	1.29	1.01	1.01	0.40	0.40
[%]	9.5	5.2	3.6	1.1	0.9
Hornos largos vía seca [millones de toneladas anuales]	9.48	11.45	12.99	11.87	12.39
[%]	69.5	59.2	46.3	33.6	28.4
Hornos con precalentadores [millones de toneladas anuales]	0	0	1.45	1.68	1.70
[%]	0	0	5.2	4.7	3.9
Hornos con precalcinadores [millones de toneladas anuales]	2.87	6.87	12.59	21.42	29.18
[%]	21.0	35.6	44.9	60.6	66.8
<b>TOTAL</b>	<b>13.64</b>	<b>19.34</b>	<b>28.03</b>	<b>35.37</b>	<b>43.67</b>

Fuente: CEMBUREAU, varios años, World Cement Directory, Bruselas, Bélgica

#### 4.3.2 Sustitución parcial del clínker por materiales con propiedades cementantes

El consumo de energía depende de la cantidad de clínker producida, la cuál es utilizada para fabricar los diferentes tipos de cementos. Para analizar la manera en que esto influye en el consumo de energía de esta industria, se calculó la relación clínker-cemento dividiendo la producción nacional de clínker<sup>179</sup> entre la del cemento. En la tabla 4.9 se presenta la producción estimada de clínker y la relación clínker-cemento para diferentes años.

Una medida importante para reducir el consumo específico de energía térmica es disminuir la cantidad de clínker producida sin afectar la cantidad de cemento producido a través de la sustitución parcial del clínker por materiales con propiedades cementantes como son las puzolanas, la escoria granulada de alto horno y la ceniza volante. En México se producen

<sup>178</sup> CEMBUREAU, 1997, *World Cement Directory 1996*. Bruselas, Bélgica.

<sup>179</sup> No se encontraron datos de la producción de clínker en el periodo analizado, sin embargo, se estimó con los datos de la capacidad instalada del clínker y el porcentaje de utilización de esta capacidad instalada, considerando que es el mismo porcentaje de utilización de la capacidad instalada para la fabricación de cemento.

exclusivamente los cementos Portland puzolánicos ya que se cuenta con una gran cantidad de puzolanas naturales de origen volcánico como son las tobas y las pumicitas. Los cementos Portland-escoria de alto horno y cementos Portland-ceniza volante no se fabrican en México debido a que no se produce una cantidad significativa de la escoria granulada de alto horno en las plantas siderúrgicas, ni de ceniza volante en las carboeléctricas; además el costo de transporte de éstas a las plantas de cemento es muy alto.

**Tabla 4.9 Producción de clínker en la industria del cemento en México y la relación clínker-cemento**

Año	Producción de clínker [millones de toneladas de clínker]	Relación clínker – cemento
1981	15.54	0.86
1982	15.94	0.83
1983	14.74	0.86
1984	16.09	0.87
1985	18.08	0.87
1989	21.40	0.92
1990	21.98	0.85
1991	23.67	0.94
1992	24.12	0.93
1993	24.25	0.89
1994	26.64	0.89
1995	21.18	0.88

Fuente: Elaboración propia con datos de CEMBUREAU, varios años, World Cement Directory, Bruselas, Bélgica y CANACEM, 1987, *Anuario 1987*, México, D.F.

En México, el contenido de puzolanas en el cemento Portland-puzolánico varía entre el 15 y 40%, de acuerdo al fabricante,<sup>180</sup> se le añade aproximadamente un 5% de yeso y lo restante es clínker. Este tipo de cemento se comenzó a producir desde la década de los cuarentas en una planta de Sinaloa para la construcción de una presa hidroeléctrica en la zona noreste del país. Como se observa en la tabla 4.10, tanto la producción como el empleo del cemento Portland-puzolánico ha aumentado y se ha extendido por todo el país favorecido por la aparición de normas que regulan su fabricación y su uso.<sup>181</sup>

Es importante mencionar que la empresa siderúrgica AHMSA tiene un proyecto conjunto con Cementos APASCO de construir una planta cementera en Monclova, cerca de las plantas siderúrgicas, lo que permitiría aprovechar subproductos de la industria siderúrgica para la producción de cementos Portland -escoria de alto horno.

<sup>180</sup> NOM-C2-1986

<sup>181</sup> La norma NOM-C2-1986 determina las especificaciones químicas y físicas que debe tener el cemento puzolánico; el muestreo; los métodos de prueba; el marcado, etiquetado, envase y embalaje; el almacenamiento y el uso de este tipo de cemento.

La norma NOM-C273-1978 determina la actividad puzolánica de las puzolanas

**Tabla 4.10 Producción de cementos Portland – puzolánicos en la Industria cementera mexicana**

Año	Producción de cemento Portland-puzolánico [millones de toneladas]	Participación respecto a la producción nacional [%]
1972	1.12	13.0%
1978	2.66	18.9%
1984	6.31	34.2%
1990	10.01	42.0%

Fuente: CANACEM, 1987, *Anuario 1987*, México, D.F.; SEMIP, 1992, Características del consumo de energía en la Industria del Cemento en México: evolución y perspectivas, enero, México, D.F.

#### 4.3.3 Sustitución parcial de los combustibles fósiles por residuos industriales

Las características operativas del horno de cemento descritas anteriormente permiten sustituir parcialmente los combustibles fósiles por materiales de desecho con lo que se puede recuperar energía de ellos y destruir de manera controlada y eficiente cierta cantidad de residuos sólidos y líquidos. En la industria del cemento en México, los desechos empleados como combustible en los hornos son llantas, aceites y lubricantes usados.

Las plantas que queman llantas de desecho las introducen troceadas en el extremo final del horno y cuentan con equipo especial como una tolva de recepción, bandas transportadoras, elevadores, un mecanismo que las introduzca en el horno; así como sistemas de monitoreo de contaminantes. De acuerdo a la experiencia en estas plantas, las llantas pueden sustituir hasta un 15% de los combustibles utilizados.<sup>182</sup>

Por otro lado, el llamado combustible alternativo es una mezcla balanceada de natas de pinturas, solventes, tintas para impresión, lubricantes y aceites usados (excepto aceites solubles y dieléctricos que contengan bifenilos policlorados),<sup>183</sup> el cuál se introduce al horno en el quemador primario. Las plantas que utilicen este combustible alternativo deben contar con laboratorios, transporte especializado y una planta formuladora que trate, mezcle y homogenice los residuos industriales. El combustible alternativo derivado de aceites puede sustituir hasta un 40% de los combustibles comúnmente empleados por planta.<sup>184</sup>

El empleo de estos residuos es poco significativa respecto a los combustibles fósiles a pesar de que sus emisiones contaminantes no son mayores relacionadas con la combustión de estos últimos.<sup>185</sup> Esto se debe a una falta de normatividad ecológica que incentive su recolección,

<sup>182</sup> Cortés, F., 1995, *Sesión de llantas usadas. Taller sobre minimización de residuos y producción más limpia en América Latina y el Caribe*. INE, México

<sup>183</sup> Flores, J., 1994, "Lubricantes usados", en *Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos*, realizado en noviembre de 1994 en México, D.F., p. 1-12

<sup>184</sup> Meza, L., 1995, "Estudio de la problemática del manejo de los aceites usados generados por diferentes medios de transporte", en *CENAPRED*, México, julio, p. 51.

<sup>185</sup> Ozawa, L., 1997, "Demanda de energía en la Industria del Cemento en México y opciones de ahorro: sustitución de combustibles y uso de control difuso para el horno rotatorio de cemento", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., julio, México, D.F., p. 77,81.

transporte y combustión en los hornos. Los residuos deben emplearse bajo un protocolo de pruebas que debe ser autorizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE), en el cuál se establece que las plantas cementeras que queman residuos deben demostrar la eficiencia y seguridad del proceso. En este protocolo de pruebas se debe describir el proceso de fabricación en condiciones normales: tipo de horno, dimensiones del horno, caudal de alimentación de materia prima, diagramas de flujo de material, tipo y caudal de combustibles, temperatura y presión a la que se alimenta el combustible en el horno y en los precalcinadores, el porcentaje de oxígeno en la zona de combustión primaria del horno y a la salida de los precalcinadores, emisiones, tiempo de residencia de los gases en el horno, producción de clínker, equipos y dispositivos de control de emisiones; así como las modificaciones al proceso cuando se introduce el combustible alterno. Posteriormente se hace una comparación de la concentración de emisiones obtenidas en condiciones normales y al emplear combustibles alternos.

Actualmente, el INE ha autorizado el empleo de residuos de llantas en tres plantas de cemento, y el uso de combustibles alternos derivados de aceites y lubricantes usados en siete plantas.<sup>186</sup>

#### **4.4 Consumo específico de energía y emisiones específicas de bióxido de carbono de la industria del cemento en México**

De 1970 a 1995, el consumo específico de energía primaria en la industria del cemento en México disminuyó de 5.6 a 4.7 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. Sin embargo, sólo se examinó el periodo de 1981 a 1995 debido a la falta de datos de la producción de clínker, el cuál es fundamental para el cálculo del índice de producción física que se emplea tanto en el análisis de descomposición como en el análisis de eficiencia-estructura.

Es importante mencionar que de 1970 a 1981, el CEE<sub>p</sub> aumentó de 5.6 a 5.9 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento; sin embargo, la producción de cemento creció a un ritmo anual del 8%, mientras que el consumo de energía primaria se incrementó a una tasa del 8.6%. Durante este periodo de cuatro plantas que empleaban hornos de proceso húmedo, dos plantas sustituyeron dichos hornos por los de vía seca y una aumentó su capacidad instalada con hornos con precalcinadores. También varias plantas de proceso seco incrementaron su capacidad o la sustituyeron por equipos más eficientes. Por otro lado, los cementos Portland-puzolánicos aumentaron ligeramente su participación en la producción nacional (tabla 4.10). A pesar de que se presentaron cambios estructurales y tecnológicos que debieron contribuir a la reducción del CEE<sub>p</sub>, éste se incrementó. Sin embargo, de 1981 a 1995 el CEE<sub>p</sub> se redujo un 20% (1.2 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento).

---

<sup>186</sup> Cortés, F., 1995, *Op. cit.* y Meza, L., 1995, *Op. cit.*, p. 51.

Finalmente, se observó que de 1981 y 1995, las emisiones de carbono totales de la industria del cemento en México se incrementaron notablemente; sin embargo, las emisiones específicas totales se disminuyeron de 224 a 208 kg C/ton de cemento.

#### 4.4.1 Análisis de descomposición

Para el análisis de descomposición se empleó la técnica aditiva de intensidad energética descrita por las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12, pero tomando en cuenta los cambios en la composición de la producción de esta industria a lo largo del tiempo a través del índice de producción física y los factores de ponderación mencionados en la tabla 1.4. Además se estimaron los índices de promedio simple (AVE-PDM2) empleando únicamente como año inicial 1981 y como año final 1995, debido a la falta de datos de la producción de clínker en el periodo anterior (1970-1980).

De 1981 a 1995, el consumo específico de energía primaria se redujo 1.2 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento (20%). Los resultados de la tabla 4.11 muestran que si la eficiencia energética se hubiera mantenido a los niveles de 1981, el CEE<sub>p</sub> hubiera aumentado 0.03 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. Por otro lado, si la relación clínker-cemento se hubiera mantenido, el CEE<sub>p</sub> se hubiera reducido en 1.25 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. Las mejoras en la eficiencia energética que permitieron esta reducción son: la sustitución del proceso húmedo por el proceso seco, la ampliación de la capacidad instalada a través de la construcción de nuevas plantas y de la modernización de las plantas existentes.

Durante el periodo analizado, la participación del proceso húmedo en la capacidad instalada nacional se redujo de 5.2% en 1981 a 0.1% en 1995; por otra parte los hornos largos vía seca fueron sustituidos por hornos con precalcinadores, el porcentaje de la capacidad instalada de estos últimos creció de 35.5% a 66.8% (ver tabla 4.7).

Entre 1981 y 1995, cinco plantas de reducida capacidad instalada cerraron debido a su baja productividad, equipo obsoleto y altos costos de producción; por otro lado, se construyeron 8 nuevas plantas equipadas con hornos secos con precalcinadores de gran capacidad, modernos sistemas de molienda, sistemas automatizados de control de proceso, de calidad y equipos recolectores de polvo. Mientras que la capacidad instalada en las plantas existentes se amplió con algunos equipos de esta moderna tecnología.

**Tabla 4.11 Cambios en el consumo específico de energía de la industria cementera mexicana entre 1981 y 1995**

Período	CEE <sub>p</sub> (1981) [GJ/ton cem]	Estructura [GJ/ton cem]	Eficiencia [GJ/ton cem]	CEE <sub>p</sub> (1995) [GJ/ton cem]
1981-1995	5.95	0.03	-1.25	4.74

Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, Balance Nacional 1996, México, D.F.; CEMBUREAU, varios años, World Cement Directory, Bruselas, Bélgica; INEGI, 1992, *Estadísticas históricas de México*, Tomo 2, México, D.F.

De acuerdo a esta metodología, los cambios estructurales no contribuyeron a la disminución del  $CEE_p$ , sin embargo, su influencia en este cambio es poco significativa. Durante el periodo analizado, la relación clínker-cemento se incrementó en un 3.5%.

Por otro lado, las exportaciones de clínker y de cemento aumentaron en la década de los ochentas, se redujeron drásticamente en 1990 a raíz de la demanda de *dumping*, y en 1995 se incrementaron nuevamente.

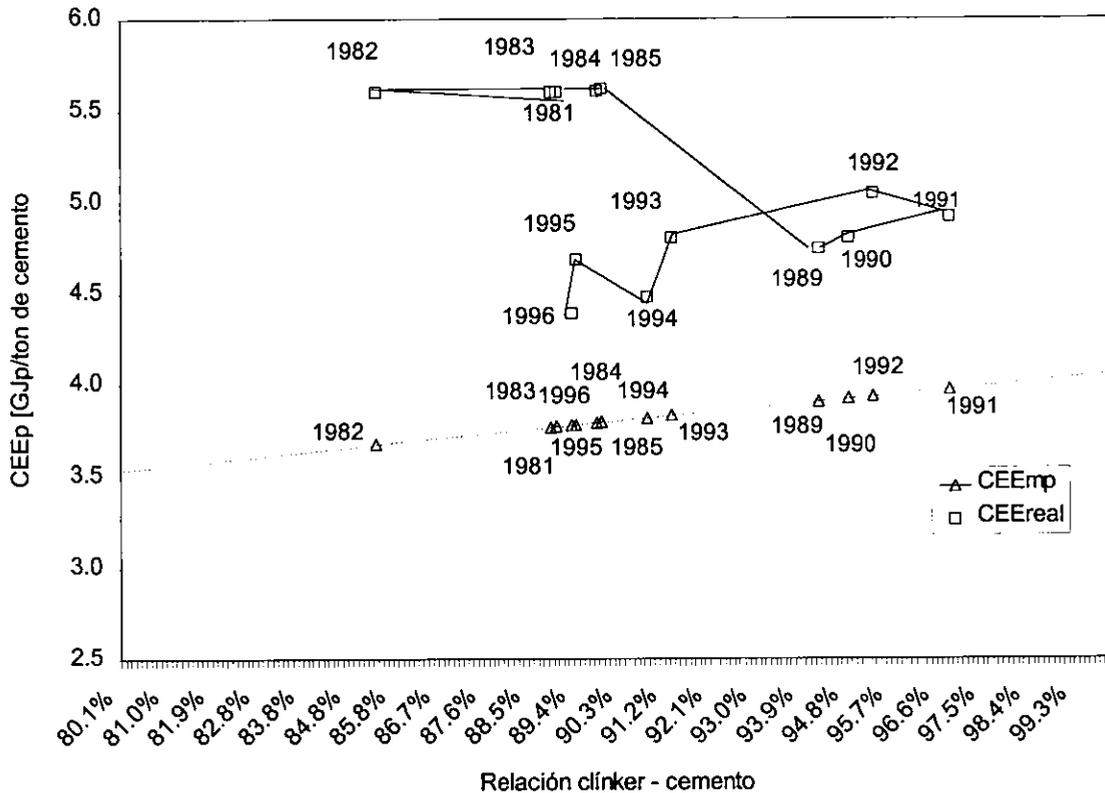
### 4.4.2. Análisis de estructura-eficiencia

De acuerdo a la metodología de comparaciones internacionales, el  $CEE_p$  de la industria del cemento depende de la materia prima, de los tipos de cemento producidos y de la eficiencia energética de los procesos empleados. Los factores estructurales en los cuáles interviene tanto la materia prima como la composición de los productos finales se sintetizan en la relación clínker-cemento.

Con base en esta metodología, la disminución del  $CEE_p$  se debe a factores tanto de mejoramiento de la eficiencia energética como estructurales. En la figura 4.3 se observa que de 1981 a 1985, el  $CEE_p$  real se mantuvo casi estable a pesar de las variaciones de sus factores estructurales. Durante este periodo, no hubo sustitución del proceso húmedo al proceso seco aunque éste último incrementó su capacidad instalada.

De 1985 a 1989, el  $CEE_p$  se redujo drásticamente debido a mejoras en la eficiencia energética, entre las cuáles se encuentran el cierre de plantas obsoletas y la sustitución de la capacidad instalada de proceso húmedo a proceso seco. Durante este periodo, las exportaciones de clínker y de cemento aumentaron notablemente y la relación clínker- cemento se incrementó.

De 1989 a 1991, el  $CEE_p$  aumentó, la relación clínker-cemento se incrementó nuevamente, las exportaciones disminuyeron y no se observaron cambios tecnológicos que favorecieran la eficiencia energética. Entre 1991 y 1994, el  $CEE_p$  disminuyó; tanto los factores estructurales como los de eficiencia energética contribuyeron a esta reducción. La relación clínker – cemento decreció debido posiblemente a un incremento en la producción de cementos mezclados con un mayor contenido de puzolanas; por otra parte, la capacidad instalada de hornos con precalcinadores aumentó. En 1995, el consumo de energía primaria se incrementó a pesar de una disminución de la relación clínker – cemento y del inicio de operaciones de tres nuevas plantas. En este año, la producción nacional de cemento así como el consumo final de esta industria se redujeron notablemente debido a una crisis económica originada por la devaluación de la moneda nacional. En 1996, la producción nacional de cemento se incrementó nuevamente favorecida por un aumento en las exportaciones. La reducción del  $CEE_p$  se debió posiblemente a que la capacidad instalada se empleó de manera más eficiente con este crecimiento de la producción.



Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F.; INEGI, 1992, *Estadísticas históricas de México*, Tomo 2, México, D.F.; y datos de la Cámara Nacional del Cemento.

**Figura 4.3 Comparación del CEEp actual con el de la “mejor práctica” de la industria del cemento en México (1981-1996)**

Finalmente, se estimó el potencial de ahorro de energía de esta industria para 1995 comparando el CEE<sub>p</sub> real, que fue de 4.7 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento, con el CEE<sub>p</sub> de la “mejor práctica” calculado en 3.4 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento, se determinó que el potencial técnico ahorro de energía para 1995 era del 27%.

**4.4.3. Emisiones de carbono**

Las emisiones de carbono que se generan en la industria del cemento se deben a la calcinación de la materia prima y a la quema de combustibles fósiles durante la etapa de fabricación del clinker. Una de las principales medidas para reducir estas emisiones es el empleo de cementos mezclados, como el cemento Portland-puzolánico, ya que disminuye la demanda de clinker.

En 1995, la industria del cemento en México generó 5 millones de toneladas de carbono, de las cuáles el 57% se debió a la calcinación de la materia prima y el 43% al consumo de

combustibles fósiles. Entre 1981 y 1995, estas emisiones se incrementaron de 4 a 5 millones de toneladas de carbono a una tasa anual del 1.5% debido principalmente al crecimiento de la producción; sin embargo, las emisiones específicas totales disminuyeron de 224 a 208 kg C/ton de cemento. En este periodo, las emisiones específicas de carbono debidas a la calcinación aumentaron en 0.5%, mientras que las que se debieron exclusivamente al empleo de combustibles se redujeron en un 16%.

Para analizar los diferentes factores que contribuyeron a la disminución de las emisiones específicas de carbono debidas al consumo de energía se empleó la metodología del análisis de descomposición de acuerdo a las ecuaciones 1.19, 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23, utilizando los índices de promedio simple (AVE-PDM2) para el año final y el año inicial debido a la disponibilidad de datos.

De manera similar al CEE<sub>p</sub>, los resultados de la tabla 4.12 muestran que la eficiencia energética fue el principal factor que contribuyó a la reducción de las emisiones específicas de carbono en esta industria a través de las diferentes medidas de eficiencia energética que se mencionaron anteriormente.

**Tabla 4. 12 Efectos de los cambios de las diferentes variables que influyen en las emisiones específicas de carbono en la industria siderúrgica mexicana**

	Cambios 1981-1995 [kg de C/ton de cemento]
Emisiones específicas 1981-1995	-16.7
Estructura (IFP/P)	0.9
Eficiencia energética (E/IFP)	-21.0
Factores de emisión de carbono (FEC/E <sub>i</sub> /E)	3.2

Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, D.F.; INEGI, 1992, *Estadísticas históricas de México*, Tomo 2, México, D.F.; IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, p. 1.6.

Finalmente, en el último factor se incluyen los cambios tanto en los factores de emisión como en la mezcla de combustibles en la industria del cemento y en la generación de electricidad. Se observa que este factor tampoco favoreció la reducción de las emisiones específicas de carbono.

En general, la mezcla de los combustibles fósiles en esta industria no se modificó drásticamente de 1981 a 1995, las variaciones en el consumo de combustóleo y gas natural se debieron a las condiciones en la oferta de gas natural y a sus precios. La participación de la electricidad se incrementó ligeramente.

En cuanto a la mezcla de combustibles en la generación de electricidad. En 1981, el factor de emisión de electricidad fue de 46.6 ton C/TJ, y en 1995 aumentó a 49 ton C/TJ (Tabla 1.2). Este incremento se debió a la reducción de la generación eléctrica con energías renovables, principalmente en hidroeléctricas cuya participación en la capacidad instalada disminuyó un 10%.

## 4.5 Comparaciones internacionales

En 1994, la producción mundial de cemento fue de 1380.9 millones de toneladas. Para lo cual se consumieron 6585 PJ de energía primaria y se emitieron 307 millones de toneladas de carbono de las cuáles 160 millones de toneladas se deben a la decarbonatación de las materias primas y 167 millones al empleo de combustibles fósiles.<sup>187</sup> Como se puede apreciar, esta industria es intensiva en el uso de la energía, ya que emplea aproximadamente el 2% del consumo final mundial y es responsable del 4.9% de las emisiones de carbono que se emiten a la atmósfera.<sup>188</sup>

Se analizaron principalmente las industrias cementeras de China, Japón, Estados Unidos, India, Corea del Sur, Alemania, México, Brasil y Canadá, las cuáles se encuentran dentro de los 20 principales productores de cemento en el mundo (tabla 4.13). Se emplearon indicadores físicos de eficiencia energética en un nivel de agregación de rama industrial, debido a la disponibilidad de datos, se calcularon el CEE<sub>p</sub> real, el CEE<sub>p</sub> de la mejor práctica, las emisiones de carbono totales, las emisiones específicas y el potencial de ahorro de energía de estos países para 1994 (tabla 4.14).

**Tabla 4.13 Producción de cemento en 1994 de los 20 principales productores del mundo**

Países	Producción de cemento [millones de toneladas de cemento]	Tasa de crecimiento anual 1970-1994 [%]
China	421.0	12.2
Japón	91.6	2.0
Estados Unidos	77.9	0.5
India	62.3	6.4
Ex Unión Soviética	60.9	-1.8
Corea del Sur	51.6	9.5
Alemania	36.1	-0.1
Italia	33.2	0.01
Turquía	31.9	6.9
Tailandia	31.1	10.8
<b>México</b>	<b>29.8</b>	<b>5.8</b>
España	26.7	2.0
Brasil	25.2	4.4
Taiwán	23.2	7.0
Indonesia	21.9	16.5
Francia	21.2	-1.3
Egipto	16.1	6.3
Arabia Saudita	16.0	14.2
Irán	15.9	7.9
Polonia	14.9	0.9
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>1380.9</b>	<b>3.6</b>

Fuente: Cembureau, 1998, *World Cement Market in Figures 1913-1995* (World statistical review no. 18, Edición especial: datos de producción de cemento, comercio y consumo), Bruselas, Bélgica.

<sup>187</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999. *International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector*. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBID-2297).

<sup>188</sup> De acuerdo al CDIAC (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/global96.ems>), las emisiones mundiales en 1994 fueron de 6221 millones de toneladas de carbono.

Tabla 4.14 Principales características de la industria cementera de los países analizados en 1994

País	Producción [millones de toneladas de cemento]	Participación en la producción mundial [%]	CEE <sub>p</sub> [GJ <sub>p</sub> /ton de cemento]	Energía primaria <sup>189</sup> [PJ <sub>p</sub> ]	Emisiones totales de carbono <sup>190</sup> [millones de toneladas de carbono]	Emisiones específicas de carbono [ton de C/ton de cemento]	Proporción de las emisiones en la emisión mundial [%]
China	423	30.5%	5.0	2197	101.4	0.24	33.0%
Japón	92	6.6%	3.5	280	15.6	0.17	5.1%
EUA	78	5.6%	5.5	434	18.9	0.24	6.2%
India	62	5.0%	5.0	309	15.8	0.25	5.1%
Corea del sur	52	3.7%	4.3	220	11.4	0.22	3.7%
Alemania	36	2.6%	3.8 <sup>191</sup>	137	6.7	0.19	2.2%
<b>México</b>	<b>30</b>	<b>2.2%</b>	<b>4.5</b>	<b>135</b>	<b>6.0</b>	<b>0.20</b>	<b>2.0%</b>
Brasil	25	1.8%	4.1	103	4.4	0.17	1.4%
Canadá	10	0.8%	3.8	53	2.5	0.24	0.8%
<b>TOTAL mundial</b>	<b>1381</b>	<b>100%</b>	<b>4.8</b>	<b>6585</b>	<b>306.9</b>	<b>0.22</b>	<b>100%</b>

Fuentes: Cembureau, World Cement Directory, varios años; y estadísticas nacionales de los diferentes países

Conforme a la metodología de Comparaciones Internacionales se realizó un análisis eficiencia-estructura entre los países analizados, donde se comparó el CEE<sub>p</sub> real con el de la mejor práctica de cada país, tomando en cuenta su estructura característica a través de la relación clínker-cemento y se calcularon sus potenciales de mejoramiento de eficiencia energética (Figura 4.4).

Como se observa en la tabla 4.13, China es el principal productor de cemento en el mundo y la industria cementera que genera la mayor cantidad de emisiones de carbono. En 1994, produjo 101.4 millones de toneladas de carbono, de las cuáles el 47% se debieron a la calcinación y el 53% al empleo de combustibles fósiles. Es importante mencionar que el combustible primario empleado tanto en la industria cementera como en la generación de electricidad es el carbón.<sup>192</sup> De 1970 a 1994, la producción de cemento en este país se ha incrementado drásticamente a un ritmo del 12% anual para satisfacer la demanda de construcción de residencias urbanas y rurales. De la producción de 1994, el 11% se fabricó en plantas de gran capacidad con hornos rotatorios que satisfacen mercados regionales, mientras que el 89% restante se manufacturó en pequeñas plantas con hornos verticales para mercados locales.<sup>193</sup> El CEE<sub>p</sub> de la industria del cemento en China fue de 5 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento, el cuál es relativamente alto. Esto se debe básicamente a la gran cantidad de hornos verticales de las pequeñas plantas locales los cuáles representan el 78%

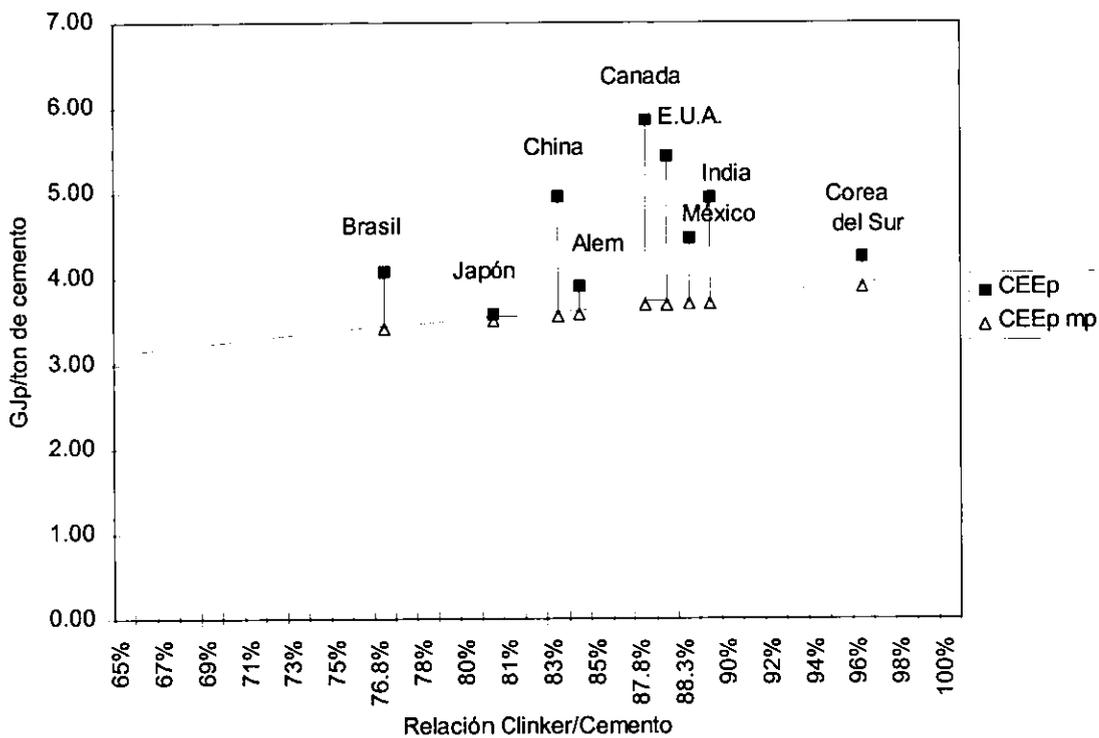
<sup>189</sup> Se consideró la eficiencia de generación de electricidad del 33%.

<sup>190</sup> Se estimaron con los factores de emisión de carbono del IPCC para combustibles fósiles en [kton de C/PJ] para combustóleo, 21.1; carbón, 25.8; gas natural, 15.3; biomasa sólida, 29.9 y keroseno, 19.6. Los factores de emisión de carbono para la electricidad en [ton de C/TJ] son para China, 73.6 (1994); Japón, 32.0 (1994); E.U.A., 47.3 (1994); India, 90.3 (1991); Corea del Sur, 29.3 (1991); Alemania, 37.7 (1993); México, 40.8 (1994); Brasil, 3.4 (1991) y Canadá, 14.6 (1994), los cuáles se obtuvieron con datos de los Balances básicos de Energía de la Agencia Internacional de Energía.

<sup>191</sup> Debido a la disponibilidad de datos de consumo de electricidad se calculó para 1995.

<sup>192</sup> Sinton, J., 1996, "Energy Efficiency in Chinese Industry: Positive and Negative Influences of Economic Systems Reforms", tesis doctoral, Universidad de California en Berkeley, Berkeley, E.U.A., p. 55-74; IEA, 1991, *Energy balances of non OECD countries*, Paris, Francia.

de los hornos empleados en esta industria. En cuanto a los hornos rotatorios de las grandes empresas, estos emplean hornos de proceso húmedo, hornos tipo Lepol (proceso semi húmedo), hornos largos de proceso seco, hornos con precalentadores y hornos con precalcinadores (ver tabla 4.15).<sup>194</sup> Sin embargo, el CEE<sub>p</sub> ha disminuido en los últimos años al mejorar la eficiencia energética en los hornos verticales y al construirse nuevas plantas. Por otra parte, la relación clinker-cemento en 1994 fue de 0.83; ordinariamente se fabrica cemento Portland aunque existe una participación significativa de los cementos mezclados.<sup>195</sup> El potencial de eficiencia energética de la industria del cemento en China en 1994 fue del 27%.



Fuente: Elaboración propia con la base de datos del INEDIS

**Figura 4.4 Comparaciones Internacionales de eficiencia energética de la industria del cemento para varios países en 1994**

El segundo productor de cemento en el mundo es Japón, en 1994 contribuyó con un 6.6% de la producción mundial, aunque también con 15.6 millones de toneladas de carbono, de las cuáles el 64% se debieron a la calcinación de la materia prima y el 36% al empleo de combustibles

<sup>193</sup> Peikang, R., et. al., "China's cement industry in 1996 and development and development prospects for 1997" en *World cement*, vol. 28, artículo 6, p. 6.

<sup>194</sup> Sinton, J., 1996, *Op. cit.*, p. 88.

<sup>195</sup> Sinton, J., 1996, *Op. cit.*, p. 88.

fósiles. La industria del cemento japonesa es una de las industrias más eficientes y productivas a nivel mundial. De 1970 a 1994, su producción de cemento creció a un ritmo anual del 2% la cuál ha abastecido completamente su mercado doméstico y sus excedentes han sido exportados principalmente a Taiwán, Singapur, Corea del Sur y Estados Unidos.<sup>196</sup> De los países analizados, Japón es el que tuvo el menor CEE<sub>p</sub> real en 1994 (3.5 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento) ya que emplearon la mejor tecnología disponible en sus plantas; el 79.7% de su capacidad instalada total estaba equipada con hornos con precalcinadores, el 18.2% con hornos con precalentadores y sólo el 2.1% con hornos largos vía seca (ver tabla 4.15).<sup>197</sup> Es importante mencionar que desde principios de la década de los ochentas, la industria cementera japonesa ha aplicado varias medidas de eficiencia energética: el cierre de plantas obsoletas, la completa desaparición del proceso húmedo, la sustitución por sistemas más eficientes en los hornos y el empleo de combustibles alternos. Un factor estructural importante que ha contribuido a disminuir su CEE<sub>p</sub> ha sido la reducción de la relación clínker-cemento de 0.92 en 1981 a 0.8 en 1994,<sup>198</sup> debido posiblemente al incremento de la participación del cemento escoria de alto horno en su producción total. El potencial de ahorro de energía para la industria del cemento en Japón en 1994 fue del 0.7%.

Estados Unidos fue el tercer productor de cemento en el mundo en 1994, fabricando el 5.6% de la producción mundial y generando 18.9 millones de toneladas de carbono, de las cuáles el 49% fueron debidas a la calcinación de la materia prima y el 51% a la combustión. El combustible primario empleado en la generación de electricidad y en la industria del cemento es el carbón; en esta última también se consumió en menor medida gas natural y coque, y se ha incrementado el uso de combustibles derivados de residuos. Entre 1970 y 1994, la producción de cemento creció a una tasa anual del 0.5%; la cuál no ha satisfecho la creciente demanda de este producto para la construcción pública y privada.<sup>199</sup> La diferencia entre la oferta y la demanda ha sido cubierta por importaciones de varias regiones del mundo, en 1997 Canadá cubrió el 30% de ellas; Latinoamérica (México, Venezuela, Brasil y Colombia), el 23%; los países europeos (España, Grecia, Italia y Turquía), el 29%; y los países asiáticos y de Oceanía (Japón, Corea del Sur, China, Australia y Nueva Zelanda), el 3%.<sup>200</sup> El CEE<sub>p</sub> de esta industria en 1994 fue de 5.5 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento; este alto consumo energético se debió a que una proporción importante de su capacidad instalada en este año estuvo equipada con hornos largos de proceso húmedo (27.1%) y de proceso seco (20%); a pesar de que también se han instalado hornos con precalentadores y con precalcinadores, los cuáles representaron respectivamente el 18.8 y 32.9% de la capacidad instalada (ver tabla 4.15). Por otra parte, la relación clínker-cemento de esta industria en 1994 fue

<sup>196</sup> ICR, 1996, The global cement report, en *International Cement Review*, segunda edición, Gran Bretaña, p. 151-154; Roy, R., 1998, "Continued growth US cement import" en *International Cement Review*, enero, Gran Bretaña, p. 57.

<sup>197</sup> Cembureau, 1997, *Op. cit.*, referencia 35

<sup>198</sup> Calculado con datos del *Cembureau World Directory 1983* y *Cembureau World Directory 1996* bajo las mismas consideraciones con las que se estimó la relación clínker-cemento para México debido a la disponibilidad de datos.

<sup>199</sup> ICR, 1996, *Op. cit.*

<sup>200</sup> Roy, R., 1998, *Op. cit.*, p. 57.

de 0.88, calculada con las consideraciones mencionadas anteriormente; y su potencial de ahorro de energía fue del 31%.

El cuarto productor de cemento en 1994 fue India, cuya producción representó el 5.0% del total mundial y generó 15.8 millones de toneladas de carbono, 48% de la calcinación de la materia prima y 52% al empleo de combustibles fósiles. Es importante mencionar que el principal combustible empleado tanto en la industria del cemento como en la generación de electricidad de este país es el carbón. De 1970 a 1994, la producción de clínker y de cemento en India aumentó a un ritmo anual del 6.4%. Entre 1970 y 1980, el crecimiento de la producción y de la capacidad instalada fue lento, sin embargo, a partir de 1982 la liberalización de la industria del cemento en este país favoreció un notable crecimiento tanto de la producción como de la capacidad instalada sobre todo en mini plantas que satisfacen la demanda en zonas rurales. En 1994, la capacidad instalada estaba integrada por 104 plantas con 64.1 millones de toneladas de clínker (92%) y varias mini plantas con una capacidad de 5.7 millones de toneladas anuales (8%).<sup>201</sup> El CEE<sub>p</sub> en 1994 de esta industria fue de 5 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. Es importante mencionar que a partir de la liberalización, esta industria se ha modernizado disminuyendo la capacidad instalada de procesos menos eficientes como el proceso húmedo, el semi húmedo y el seco en hornos largos; y por otro lado se han instalado sistemas más eficientes para los hornos verticales en las mini plantas y hornos con precalcinadores en las plantas de mayor capacidad (tabla 4.15). Por otra parte, esta industria fabrica diferentes tipos de cementos; en 1993, produjo un 71.8% de cemento Portland, 18% de cementos puzolánicos o de ceniza volante, 9% de cementos de escoria de alto horno y 2% de otros tipos.<sup>202</sup> La relación clínker-cemento de esta industria fue de 0.89 en 1994 y su potencial de ahorro de energía respecto a la "mejor práctica", del 24%.

Corea del Sur fue el sexto productor de cemento en 1994, después de la ex Unión Soviética, su producción representó el 3.7% del total mundial y para su fabricación generó 11.4 millones de toneladas de carbono, 59% debido a la calcinación y 41% al empleo de combustibles. En la mezcla de combustibles de la industria del cemento coreana, a partir de 1980 el carbón ha sustituido casi en su totalidad al combustóleo debido posiblemente al menor precio del primero después de la crisis mundial de los precios del petróleo; por otro lado, en la generación de electricidad se emplea principalmente la energía nuclear y en menor medida el combustóleo y el carbón. Entre 1970 y 1994, la producción de cemento creció a una tasa anual del 9.5% para satisfacer tanto su demanda interna como externa, principalmente a Japón, Macao, Singapur y Estados Unidos.<sup>203</sup> Es importante mencionar que a partir de 1987, la demanda interna creció debido al auge económico del país y a una plan de desarrollo gubernamental que promovió notablemente la inversión privada en el sector de la construcción. El CEE<sub>p</sub> en 1994 de esta industria fue de 4.3 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento.

<sup>201</sup> Anónimo, 1998b, "Indian cement faces some challenges, but potential for growth still massive", en *International Cement Review*, junio, p.42.

<sup>202</sup> Anónimo, 1998b, *Op. cit.*, p. 37.

<sup>203</sup> ICR, 1996, *Op. cit.*, p. 237-240.

En los últimos 10 años, esta industria se ha modernizado disminuyendo la capacidad instalada del proceso húmedo y sustituyendo todos los hornos largos vía seca por hornos con precalentadores y precalcinadores (ver tabla 4.15). Por otra parte, los tipos de cemento fabricados en esta industria son el cemento Portland y el cemento de escoria de alto horno, este último ha aumentado su participación en la producción nacional de un 2.6% en 1981 a un 6.4% en 1994.<sup>204</sup> Su relación clinker-cemento en 1994 fue de 0.88 y su potencial de eficiencia energética del 7%.

En 1994, el séptimo productor de cemento en el mundo fue Alemania<sup>205</sup>, considerando la unificación de Alemania Federal (R.F.A) y Alemania Democrática (R.D.A.), participando con un 2.6% de la producción mundial y generando 6.7 millones de toneladas de carbono de las cuáles 57% se debieron a la calcinación de la materia prima y 43% a la combustión. Al igual que en Corea del Sur, tanto la industria cementera como la industria eléctrica sustituyeron el combustóleo por carbón a partir de la crisis de los precios del petróleo en la década de los ochentas, aunque para la generación de electricidad existe una participación significativa de la energía nuclear. De 1970 a 1991, la producción en la R.F.A. disminuyó debido a una reducción en la demanda de la construcción y a una reorganización de su industria del cemento en la cuál se cerraron catorce plantas obsoletas.<sup>206</sup> Sin embargo, a partir de 1991 la demanda de cemento se incrementó al necesitar reconstruir la infraestructura en la R.D.A., aumentó la producción aunque también las importaciones para satisfacer la creciente demanda. Después de la reunificación, cinco plantas de la R.D.A. se integraron a la capacidad instalada de esta industria las cuáles posiblemente empleaban el proceso húmedo o semi húmedo,<sup>207</sup> sin embargo, estas plantas se han modernizado para ser más eficientes y cumplir con las estrictas normas ambientales europeas. El CEE<sub>p</sub> de la industria del cemento alemana en 1995 fue de 3.9 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. El cierre de plantas obsoletas y la alta proporción de los sistemas con precalentadores y precalcinadores en la capacidad instalada (tabla 4.15) mejoraron la eficiencia energética de esta industria; es importante mencionar que la entrada de las plantas de la R.D.A. no disminuyó significativamente esta eficiencia. Por otro lado, su relación clinker-cemento en 1995 fue baja, de 0.8 debido a una alta participación de los cementos de escoria de alto horno (13.4%) en la producción total.<sup>208</sup> El potencial de ahorro de energía en 1995 de esta industria fue de 7%.

México fue el décimo primer productor de cemento mundial en 1994, después de Italia, Turquía y Tailandia. Su participación en la producción mundial fue del 2.2%, y generó 6 millones de toneladas de carbono para su fabricación donde el 59% se debió a la calcinación de la materia prima y 41% al empleo de combustibles fósiles. De 1970 a 1994, la producción de cemento en México creció a un ritmo anual del 5.8% para satisfacer tanto la demanda interna como la externa;

<sup>204</sup> Datos de la Asociación de la industria del cemento de Corea.

<sup>205</sup> Antes de 1991, los datos se refieren a Alemania Federal (Occidental).

<sup>206</sup> Rock products, 1989, "International Cement Review", en *Rock products*, p. 55-78

<sup>207</sup> Se comparó la participación de los diferentes procesos antes y después de 1991 con datos del *Cembureau World Directory 1979, 1980, 1983 y 1996* y del *Bundesverband de Deutschen Zementindustrie e.V.*

<sup>208</sup> Bundesverband Deutschen Zementindustrie, e.V.

entre 1983 y 1989 sus exportaciones, principalmente a E.U.A., se incrementaron notablemente. La eficiencia energética en la industria cementera en México ha mejorado, en 1994 su CEE<sub>p</sub> fue de 4.5 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento; esto se debió a la disminución del proceso húmedo en la producción nacional, a la modernización de la capacidad instalada con sistemas de precalentadores y precalcinadores y a la construcción de nuevas plantas de gran capacidad y alta tecnología (ver tabla 4.15). Por otro lado, la participación de los cementos Portland puzolánicos en la producción nacional es significativa; en 1994, la relación clínker-cemento en esta industria fue de 0.89. El potencial de ahorro de energía en 1994 para esta industria fue del 16%.<sup>209</sup>

El décimo tercer productor de cemento en el mundo, después de España, fue Brasil que fabricó el 1.8% de la producción mundial y generó 4.3 millones de toneladas de carbono de las cuáles 61% se debieron a la calcinación de la materia prima y el 39% al empleo de combustibles fósiles. Después de la crisis de los precios del petróleo, la mezcla de combustibles en la industria del cemento se ha modificado, el combustóleo ha disminuido su participación mientras que el consumo de carbón de baja calidad y de combustibles derivados de residuos industriales y agrícolas ha aumentado. A partir de 1991 se han quemado aproximadamente 0.2 millones de toneladas de residuos en siete plantas.<sup>210</sup> En cuanto a la generación de electricidad, ésta se produce principalmente en hidroeléctricas y en menor medida en termoeléctricas que emplean carbón o combustóleo.<sup>211</sup> Entre 1970 y 1994, la producción aumentó a un ritmo anual del 4.4%. El CEE<sub>p</sub> de esta industria es de 4.1 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento. La industria brasileña de cemento ha modernizado varias de sus plantas a partir de 1982, disminuyendo la capacidad instalada del proceso húmedo a través de la conversión primero al proceso semi húmedo y posteriormente al proceso seco; instalando sistemas de precalentadores y precalcinadores en los hornos, circuitos cerrados en la molienda, separadores dinámicos de alta eficiencia, sistemas de prehomogenización, automatización y programas intensivos de productividad.<sup>212</sup> Otra característica importante de esta industria es su baja relación clínker-cemento, en 1994 fue de 0.77; esto se debe a que en los últimos años, la producción de cementos de escoria de alto horno y de cementos Portland puzolánicos ha crecido favorecida por la localización de las plantas cementeras y por el desarrollo de estándares de fabricación; la participación de estos tipos de cementos en la producción nacional fue del 11.3 y 10.3% respectivamente.<sup>213</sup> El potencial de ahorro de energía de esta industria en 1994 fue del 15%.

Finalmente, Canadá no se encontró dentro de los primeros 20 productores del mundo en 1994, sin embargo, se consideró dentro de este estudio ya que es el principal exportador de cemento a los Estados Unidos exportando el 40% de su producción a este país. Participó con un 0.8% en la producción mundial y generó 2.5 millones de toneladas de carbono, de los cuáles el 50% se debió

<sup>209</sup> Considerando una eficiencia de generación de electricidad del 33% para todos los países.

<sup>210</sup> Marciano, E., et. al., 1997, "Looking green", en *World Cement*, vol. 28, artículo 4, p. 84

<sup>211</sup> IEA, 1992, *Op. cit.*

<sup>212</sup> Marciano, E., et. al., 1997, *Op. cit.*, p. 83

a la calcinación de la materia prima y el 50% al empleo de combustibles fósiles. La mayor parte de las plantas de cemento en Canadá emplean carbón (47%) y coque (15%) como combustible primario, algunas plantas utilizan gas natural (26%) y en los últimos años el uso de combustibles derivados de residuos (9%) ha aumentado.<sup>214</sup> Para la generación de electricidad se emplearon principalmente hidroeléctricas y nucleoeeléctricas. Entre 1970 y 1994, su producción creció a un ritmo del 1.5% anual para satisfacer su demanda interna y la del mercado estadounidense. El CEE<sub>p</sub> de esta industria en 1994 fue de 5.1 GJ<sub>p</sub>/ton de cemento, este alto consumo específico se debió probablemente al alto porcentaje del proceso húmedo en la capacidad instalada total (tabla 4.15) y a una producción significativa de cementos bajos en álcalis los cuáles requieren mayor energía térmica y eléctrica en su fabricación que el cemento Portland.<sup>215</sup> En 1994, la relación clínker-cemento fue de 0.88, es importante mencionar que a diferencia de las industrias del cemento europeas, la canadiense añade los aditivos como la escoria del alto horno y las cenizas volantes en las plantas de concreto en lugar de en las de cemento. El potencial de ahorro de energía de esta industria en 1994 fue del 36%.

**Tabla 4.15 Capacidad instalada de los diferentes procesos para la fabricación de clínker para los países analizados en 1994 [millones de toneladas anuales]**

	Hornos con proceso húmedo	%	Hornos con proceso semi húmedo	%	Hornos verticales	%	Hornos largos vía seca	%	Hornos con precalentadores	%	Hornos con precalcinadores	%	Total
	[Mta]		[Mta]		[Mta]		[Mta]		[Mta]		[Mta]		[Mta]
China <sup>216</sup>	14.4	8	-	0	140.4	78	12.6	7	3.6	2	7.2	4	180
Japón	-	0	-	0	-	0	2.0	2	17.4	18	76.2	80	95.6
E.U.A.	20.1	27	0.9	1	-	0	14.8	20	14.0	19	24.4	33	74.1
India	10.4	15	2.3	3	5.7	8	4.4	6	10.7	15	36.3	52	69.8
Corea del Sur	0.6	1	-	0	-	0	-	0	8.4	15	45.8	84	54.8
Alemania <sup>217</sup>	0.9	2	5.6	13	1.3	3	2.1	5	28.1	67	4	10	41.9
México	0.2	1	-	0	-	-	12.4	33	1.7	4	23.6	62	37.9
Brasil	3.2	8	1.2	3	0.2	0	5.3	14	13.9	37	13.8	37	37.6
Canadá	2.6	17	-	0	-	0	3.4	23	3.9	26	5.0	34	14.9

Fuentes: Sinton, J., 1996, "Energy Efficiency in Chinese Industry: Positive and Negative Influences of Economic System Reforms", tesis doctoral, Universidad de California en Berkeley, E.U.A., p. 55-74; Cembureau, 1997, *World Cement Directory 1996*, Brusela, Bélgica, Anónimo, 1998b, "Indian cement faces some challenges, but potential for growth still massive", en *International Cement Review*, Gran Bretaña, enero, p. 39.

<sup>213</sup> Marciano, E., et al., 1997, *Op. cit.*, p. 82

<sup>214</sup> CIEEDAC, *Development of Energy Intensity Indicators for Canadian Industry 1990-1996*, Universidad de Simon Fraser, Vancouver, Canadá.

<sup>215</sup> Holderbank, 1993, *Op. cit.*, p. 7.

<sup>216</sup> Datos de 1993

<sup>217</sup> Datos de 1995



Tabla 4.16 Medidas de eficiencia energética para la industria del cemento (Continuación)

	Descripción	Ahorro
<b>Control y manejo de los procesos (Continuación)</b>		
• Control automatizado	La automatización se centra en el control del horno rotatorio de cemento. Al operar de manera óptima el horno, se han obtenido incrementos en la producción de clínker, mejoras en la calidad de éste y una mayor estabilidad en su operación, lo que contribuye a una reducción en el consumo térmico del horno, una menor emisión de óxidos de nitrógeno y ahorros en los refractarios. <sup>221</sup> Las técnicas empleadas más ampliamente para el diseño de estos controladores se basan en la lógica difusa y en redes neuronales, los cuáles permiten formular de manera sencilla y eficiente las estrategias de control a partir de la experiencia práctica de los operadores. <sup>222</sup> Se han desarrollado sistemas como el <i>Linkman</i> de ABB, el sistema Summit de FLS Automation. <sup>223</sup> Es importante contar con adecuados sistemas de medición y monitoreo en línea de las variables de control.	3% <sup>224</sup>
<b>Trituración y Preparación de materia prima</b>		
• Mejoramiento del molino de bolas	Este molino es ampliamente empleado debido a su bajo costo de inversión y facilidad de mantenimiento, sin embargo, es el que tiene un mayor consumo específico de electricidad. Las medidas que se recomiendan para disminuir este consumo son: la optimización de la distribución de los medios de molienda; la instalación de diafragmas ajustables para controlar el flujo de la carga; la optimización de la cámara de secado/pulverización en el molino; la introducción de motores de velocidad controlada y la operación en circuito cerrado empleando clasificadores de alta eficiencia.	
• Sustitución del molino de bolas por molinos de rodillos	Los molinos de rodillos verticales permiten una mayor flexibilidad de la materia prima, tienen una mayor capacidad de secado y un menor consumo de electricidad. <sup>225</sup>	5 – 15% (1.5 – 4.5 kWh/ton de cemento) <sup>226</sup>
<b>Horno</b>		
• Conversión del proceso húmedo a seco	El proceso debe ser modificado desde los sistemas de molienda y homogenización donde se les añade agua o bien instalar filtros mecánicos para reducir la humedad de la materia prima o secadores hasta el horno rotatorio. Esta conversión es muy costosa y sólo se justifica donde el mercado de cemento es creciente.	2.1 GJ/ton. de clínker (39%) <sup>227</sup>
• Modernización del proceso seco con sistemas de precalentadores y precalcinadores	En los sistemas con precalentadores y precalcinadores al calcinarse parcialmente la harina en ellos, la productividad se incrementa notablemente y el tamaño del horno puede reducirse, con ello las pérdidas de calor por radiación se reducen. Por otro lado, la transferencia de calor de los gases calientes a la harina cruda es mejor; y si se cuenta con ciclones de baja caída de presión y buena eficiencia de separación de polvo se reduce notablemente el consumo de energía y de electricidad. Debido al incremento en la productividad es necesario instalar enfriadores capaces de manejar mayores cantidades de clínker.	1.3 GJ/ton. de clínker (28.7%) <sup>228</sup> 1.5 GJ/ton de clínker (32.8%) <sup>229</sup>

<sup>220</sup> Birch, E., 1990, *Op. cit.*, p. 122.

<sup>221</sup> Bentrup, K., 1994, "Sistemas expertos en la Industria del Cemento", en *World Cement*, agosto.

<sup>222</sup> Ostergaard, J., 1982, "Control of a cement kiln by Fuzzy Logic" en *FLS-Review*, no. 67, p. 3-11

<sup>223</sup> Guardiola, C., et. al., 1994, "Summit control system for Cementos de Chihuahua", en *World Cement*, abril, p.32

<sup>224</sup> Levine, P., 1990, "Expert systems for kiln control and heat economics" en *World Cement*, abril, p. 135.

<sup>225</sup> Se refiere al ahorro en el consumo de electricidad respecto al molino de bolas. Fuente: Anónimo, 1998, *Op. cit.*, referencia 2, p. 58.

<sup>226</sup> Holderbank, 1993, *Op. cit.*, p.11.

<sup>227</sup> Sustituido por un horno seco con precalentadores, Fuente: Peray, K.E., 1979, *Op. cit.*, p. 109-111.

<sup>228</sup> Sustitución de un horno largo seco por un horno corto con precalentadores. Fuente: Peray, K.E., 1979, *Op. cit.*, p. 109-111.

<sup>229</sup> Sustitución de un horno largo seco por un horno corto con precalentadores y precalcinadores. Fuente: Peray, K.E., 1979, *Op. cit.*, p. 109-111.

Tabla 4.16 Medidas de eficiencia energética para la industria del cemento (Continuación)

Descripción		Ahorro
<b>Horno (Continuación)</b>		
• Mejoras de los sistemas de combustión en el horno	Los quemadores multicircuitos poseen una componente radial y otra axial que ajustan y estabilizan la forma de la flama, lo que favorece el control de la formación de la costra, la carga térmica en los refractarios, la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno. <sup>230</sup>	0.04 GJ/ton clinker <sup>231</sup>
• Recirculación del material en el precalcinador	Recircula la materia prima hasta que alcance un nivel adecuado de calcinación. Aumenta el tiempo de residencia del material y disminuye la temperatura de calcinación.	0.19 GJ/ton clinker (1.8%) <sup>232</sup>
• Mineralizadores	La adición de mineralizadores permite producir clinker a menores temperaturas sin variar sus propiedades. Algunos de los mineralizadores estudiados son: combinaciones de bario, calcio, fluoruros de magnesio, sulfatos y carbonatos.	
• Recuperación de calor de desecho	En los enfriadores, el calor de desecho que no se emplea como aire secundario o terciario para la combustión del horno y de los precalcinadores respectivamente; se puede utilizar después del equipo recolector de polvo y empleando intercambiadores de calor para calentamiento de agua, para calefacción de la planta y de sus alrededores o para generar vapor para producir electricidad. <sup>233</sup> Los gases de salida del horno pueden ser aprovechados para el secado de materias primas en los secadores o en los molinos. Generalmente las temperaturas de estos gases son: para el horno húmedo de 180 a 260°C, para el horno largo seco de 550 a 760°C, para un horno con precalentadores de 4 etapas de 330 a 380°C, y para un horno con precalentadores y precalcinador de 300 a 360°C. <sup>234</sup>	0.28 GJ/ton de cemento <sup>235</sup>
<b>Molienda de Cemento</b>		
• Clasificadores de alta eficiencia	Es recomendable que los clasificadores o separadores se empleen tanto en la molienda de materias primas como en la de cemento en circuito cerrado, en ellos las partículas gruesas se regresan a los molinos, mientras que las finas continúan el proceso. Los separadores de alta eficiencia clasifican mejor las partículas finas, lo que reduce el reciclaje excesivo en la molienda. Existen varios conceptos de separadores como los de ciclones, los de aire espiral y los de cascada tipo "V" entre otros. <sup>236</sup>	11% (2.6 kWh/ton. de cemento = 0.01 GJ/ton. de cemento) <sup>237</sup>
<b>Consumo eléctrico</b>		
• Motores de alta eficiencia	Los motores son utilizados en varios equipos: molinos, horno rotatorio, ventiladores, separadores, válvulas distribuidoras, transportadores y enfriadores de parrillas. Generalmente estos motores están sobredimensionados y se operan en rangos ineficientes lo que ocasiona una disminución del factor de potencia de las plantas. El ahorro de electricidad respecto a los motores convencionales dependerá de su potencia.	10% para motores de baja potencia, 1% para motores de alta potencia (> 250 HP) <sup>238</sup>

<sup>230</sup> Endres, G., "Reducción de emisiones y consumo de energía en hornos rotativos, por medio de una tecnología de punta de combustión" en *Cemento y Hormigón*, no. 718, p. 413-421.

<sup>231</sup> Rosemann, H., P. Künne, 1990, "Operating experience with a new type of burner for rotary kilns", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, Alemania, p. 247-249.

<sup>232</sup> Kresiberg, A., G. Kapoor, 1990, "Advancements in precalciners and preheaters", en *World Cement*, p. 89 - 93.

<sup>233</sup> Bo, A., 1990, "District heating based on waste heat from clinker cooler", en *Energy efficiency in the cement industry*, J. Sirchis (editor), Elsevier, L.T.D., Gran Bretaña, p.73-77.

<sup>234</sup> Da Silva, J., 1993, et. al., *Op. cit.*, p. 365.

<sup>235</sup> Se refiere al empleo de gases de desecho provenientes de los gases de salida de precalentadores o de los enfriadores para el secado de materia prima en molinos de rodillos o de bolas. Fuente: Holderbank, 1993, *Op. cit.*, referencia 2, p. 11.

<sup>236</sup> Conroy, G., 1994, et. al., op., cit., p. 365.

<sup>237</sup> Anónimo, 1985, "Ahorro de energía en la molienda al usar separadores 'Cyclopol' de alto rendimiento", en *Cemento y Hormigón*, no. 622, septiembre, p. 796.

<sup>238</sup> Respecto a los motores convencionales. Fuente: Holderbank, 1993, *Op. cit.*, p.11.

**Tabla 4.16 Medidas de eficiencia energética para la industria del cemento (Continuación)**

	<b>Descripción</b>	<b>Ahorro</b>
<b>Consumo eléctrico</b>	<b>(Continuación)</b>	
• Controladores de velocidad variable	Otra medida importante para reducir el consumo eléctrico es disminuir las pérdidas debidas al acoplamiento y al uso de válvulas reguladoras del aire (en los ventiladores). Estos controladores permiten variar la velocidad de acuerdo a la carga. Algunos de los controladores empleados son los convertidores de corriente continua, convertidores trifásicos para motores de jaula de ardilla, el convertidor estático subsíncrono en cascada y los cicloconvertidores.	35% <sup>239</sup>
<b>Sustitución de</b>	<b>materias primas</b>	
• Cementos mezclados	La producción de cementos mezclados permite disminuir el consumo de energía y el empleo de recursos naturales como la caliza y la arcilla al reducir la cantidad de clínker requerido así como al disminuir las emisiones de carbono debidas tanto a la calcinación de la materia prima como a la combustión en la fabricación del cemento. Además permite utilizar subproductos industriales que tengan propiedades hidráulicas como la ceniza volante de las carboeléctricas y la escoria de alto horno de las siderúrgicas lo que representa beneficios económicos y ambientales, reduciendo el problema de la disposición de desechos sólidos.	Cementos puzolánicos <sup>240</sup> 1.23 GJ/ton de cemento Cemento escoria de AH <sup>241</sup> 3.18 GJ/ton de cemento <sup>242</sup>
Empleo de otros desechos sólidos industriales como materias primas	Existen algunos desechos sólidos industriales que por sus características químicas en cuanto a su contenido de carbonatos, fosfatos y cuarzo entre otros; pueden ser utilizados como materia prima y reducir el consumo de caliza, así como el problema sobre la disposición de estos residuos; por ejemplo, lodos que contienen cal (provenientes de la industria del papel, de la industria azucarera), lodos que contienen carbonatos (de las refinerías en la generación del gas del acetileno o del sulfato de amonio), lodo rojo (de la industria del aluminio) y polvo del horno de clínker. Es importante tomar en cuenta que en algunos casos se requiere remover ciertas impurezas.	Permite un ahorro de caliza entre un 10-27% <sup>243</sup>
<b>Sustitución de</b>	<b>Combustibles</b>	
• Sustitución de combustibles fósiles por residuos sólidos industriales, agrícolas o municipales	Las características de operación del horno como son las altas temperaturas de incineración (temp. de la flama entre 1800 y 2000°C), el contacto intensivo en contracorriente de los gases y el material, y la temperatura de los gases de salida permiten el empleo de estos residuos ya que se destruyen compuestos orgánicos tóxicos y se incorporan trazas de elementos en el clínker. Esto permite también la reducción de desechos, cuya adecuada eliminación desde el punto de vista ambiental resulta muy costosa. Los principales residuos utilizados son las llantas enteras o en trozos <sup>244</sup> y los aceites y lubricantes usados <sup>245</sup> debido a su alto poder calorífico. Otros residuos que se han empleado son: desechos de refinerías, gases provenientes de rellenos sanitarios, <sup>246</sup> coque de petróleo, desechos sólidos municipales, <sup>247</sup> restos de madera, cáscaras de arroz, etc.	15% de los combustibles puede ser sustituido por llantas <sup>248</sup> 40% puede ser reemplazado por combustible derivado de aceites y lubricantes usados <sup>249</sup>

<sup>239</sup> Ablinger, A., 1987, "Medidas para la reducción del coste de la energía en fábricas de cemento con accionamientos de velocidad variable", en *Cemento y Hormigón*, España, p. 228.

<sup>240</sup> 25% de puzolanas

<sup>241</sup> 65% de escoria de alto horno

<sup>242</sup> Mullick, A., et. al., 1986, "Evaluation of Pozzolanic activity and its impact on specification of blended cement", en el 8º *Congreso Internacional de química de cemento*, Brasil, p. 308-311

<sup>243</sup> Ehardt, C., 1989, "Residuos industriales para la fabricación del cemento" en *Memorias de las III Jornadas Colombianas del Cemento que se llevaron a cabo del 19 al 22 de julio en Boyaca, Colombia*, ICPC, Colombia, p. 4 y Mullick, A., et. al., 1986, *Op. cit.*, p. 489-512

<sup>244</sup> Holderbank, *Curso de Cemento, Tecnología del Proceso, uso de combustibles alternos*, México, p. 1 – 16.

<sup>245</sup> Flores, J., 1994, *Op. cit.*, referencia 37, p. 1-12; Meza, L., 1995, *Op. cit.*, referencia 37, p. 51; y McGrath, B., 1993, "Using lubricating oil as a fuel for cement kilns" en *World Cement*, marzo, p. 19-22.

<sup>246</sup> Huntha, R., 1985, "Waste fuel survey report", en *Rock products*, abril, p. 40-43

<sup>247</sup> Michard, D., 1988, "Using kilns for incineration", en *Rock products*, julio, p. 80 – 82.

<sup>248</sup> De acuerdo a la experiencia de una planta de Apasco. Fuente: Cortés, F., 1995, *Op. cit.*

<sup>249</sup> Meza, L., 1995, *Op. cit.*, p. 51.

## 4.7 Conclusiones

A pesar de que la producción de cemento se incrementó a una tasa anual del 4.6% entre 1970 y 1995, la industria del cemento en México se desarrolló bajo una perspectiva de la conservación de recursos, del ahorro de energía y de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente las de bióxido de carbono. Durante este periodo, esta industria realizó prácticas importantes en este sentido como son: el mejoramiento de la eficiencia energética a través de la construcción de nuevas plantas diseñadas con la mejor tecnología desde el punto de vista energético y ambiental, así como la extensión y la modernización de su capacidad instalada existente; el crecimiento de la producción de cementos Portland-puzolánicos que poseen propiedades similares al comúnmente empleado cemento Portland pero requieren una menor cantidad de clínker; y el empleo de residuos, como llantas y aceites usados, como sustitutos de combustibles fósiles. La práctica de estas medidas contribuyó a que el CEE<sub>p</sub> de esta industria se redujera de 1970 a 1995 en un 7.5% y las emisiones específicas de carbono debidas exclusivamente al uso de combustibles fósiles en un 15.5%. A pesar de ser una industria bastante eficiente y competitiva a nivel mundial, lo cuál se observó al realizar comparaciones con los principales productores del mundo, aún tiene un potencial de mejoramiento de eficiencia energética respecto a la mejor práctica. En 1995, este potencial técnico de ahorro de energía se estimó de un 27%.

Como se mencionó anteriormente, las medidas recomendadas en este capítulo son generales, exclusivamente técnicas, y los porcentajes de ahorro son para plantas específicas. En un trabajo futuro, sería conveniente realizar una estimación del potencial económico de la industria del cemento para México y analizar las medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

## Conclusiones

Ante la preocupación mundial del notable aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al uso de la energía y sus efectos en el cambio climático global es recomendable establecer cuáles serían las mejores políticas, tanto nacionales como internacionales, que contribuyan a que las generaciones futuras puedan satisfacer adecuadamente sus necesidades con el menor consumo energético posible. Se ha observado que, en general y en corto plazo, una de las opciones más efectivas en la mitigación de los gases de efecto invernadero es el mejoramiento de la eficiencia energética.

El sector industrial junto con el de transporte son los más intensivos en el uso de la energía en México, por lo que existe un potencial importante de ahorro de energía si se implementan las medidas adecuadas. Esta tesis estudia el sector industrial mexicano y proporciona datos de energía necesarios para analizar las tendencias históricas y los factores que influyeron en la demanda de energía, en el consumo específico de energía, en las emisiones de bióxido de carbono y en las emisiones específicas entre 1970 y 1995 del sector industrial agregado, examinando con mayor profundidad dos ramas industriales muy intensivas en el uso de la energía: la industria siderúrgica y la industria del cemento. Estos datos permitieron analizar los cambios tecnológicos y estructurales que contribuyeron a las variaciones en los patrones del consumo de energía en este sector y en las ramas industriales estudiadas, calcular el potencial técnico de ahorro de energía, y comparar la eficiencia energética y los potenciales de ahorro para México respecto a los principales productores mundiales de estas ramas industriales. Para ello, se aplicó tanto la metodología de análisis de descomposición como el análisis de estructura-eficiencia recomendada por la metodología de Comparaciones Internacionales.

Respecto a las metodologías empleadas en esta tesis y descritas en el capítulo 1, se observó que a través del análisis de descomposición utilizado para examinar el sector industrial agregado no se puede estimar el impacto total del efecto estructural o de la intensidad energética en el consumo de energía de este sector; ya que al desagregar el impacto de este efecto en las ramas industriales se observa que cada una de ellas sigue un patrón diferente entre ellas e incluso respecto al del sector industrial nacional. La mejor aproximación para poder estimar el impacto total del efecto estructural y de la intensidad energética se obtendría en niveles de agregación más bajos, es decir, en un nivel de planta o de productos. Además, se observó que cuando se analiza el consumo de energía para periodos muy largos donde el nivel de producción crece aceleradamente,

el efecto de la actividad en el consumo de energía es considerablemente mayor que el de los cambios estructurales o de la intensidad energética; por lo que se empleó el análisis del consumo específico de energía para la industria siderúrgica y la del cemento.

El análisis de estructura-eficiencia recomendado por la metodología de Comparaciones Internacionales se empleó para analizar únicamente a la industria siderúrgica y la del cemento. Y a metodología permitió examinar los factores que influyeron en mayor medida sobre el consumo de energía y el consumo específico de energía primaria ( $CEE_p$ ) de estas industrias, de acuerdo a las materias primas empleadas, los tipos de productos finales fabricados, los procesos de fabricación y la eficiencia energética de los procesos utilizados en México durante el periodo analizado. Además, permitió comparar el  $CEE_p$  y el potencial de mejoramiento de eficiencia energética de estas industrias respecto a otros países de acuerdo a sus propias estructuras de producción.

Respecto al sector industrial agregado, analizado en el segundo capítulo, se observó que el efecto dominante sobre el incremento del consumo de energía fue la producción; aunque también la manera en que las diversas ramas industriales participaron en el valor agregado industrial. A diferencia de lo esperado, la intensidad energética aumentó de 8.9 a 11.0 MJ/dólar de 1990 entre 1970 y 1995. De acuerdo a los resultados del análisis de descomposición, los cambios estructurales fueron los que provocaron que la intensidad energética del sector aumentara. Esto se debió a que las ramas industriales más intensivas en el uso de la energía, como son la petroquímica, la industria del cemento, la siderúrgica, la de celulosa y papel y la química entre otras; aumentaron considerablemente su estructura. Sin embargo, el incremento en la estructura de algunas industrias pudo deberse a una mayor fabricación de productos con un mayor valor agregado; por ejemplo, la producción de automóviles que al añadirles componentes de lujo, de eficiencia de combustible o de reducción de contaminantes incrementan notablemente su valor agregado, aunque en este caso no aumenta de manera significativa el consumo energético por unidad producida. Por otra parte, si la estructura se hubiera mantenido constante a niveles de 1970, la intensidad energética se hubiera reducido ya que la mayoría de las ramas industriales disminuyeron su intensidad energética debido a mejoras tecnológicas.

En cuanto a las emisiones de carbono, el sector industrial incrementó sus emisiones de 10 a 30 de millones de carbono en el periodo analizado, mientras que las emisiones específicas aumentaron 48.8 g. de C/dólar de 1990. De manera similar al consumo de energía, el principal factor que contribuyó al aumento de las emisiones de carbono fue el crecimiento de la producción, mientras que las variables que influyeron en las emisiones específicas fueron los cambios en la estructura de las diferentes ramas y la sustitución de combustibles tanto en el sector industrial como en la generación de electricidad. Sin embargo, las mejoras en la eficiencia compensaron el efecto de los factores antes mencionados.

En la mezcla de combustibles del sector industrial, así como en la industria siderúrgica y la del cemento, el gas natural sustituyó al combustóleo y al coque<sup>250</sup> en diferentes proporciones. Sin embargo, esta sustitución no favoreció la reducción de la intensidad de emisiones. Esto se puede deber a un notable crecimiento en el empleo de la electricidad en casi todas las ramas industriales y a un incremento del factor de emisión de carbono de esta fuente energética durante el periodo analizado. De 1970 a 1995, este factor de emisión se incrementó de 35.5 a 49 ton C/TJ; este aumento se debió principalmente al crecimiento de la capacidad instalada y de la producción en termoeléctricas que emplean combustibles fósiles. Es importante mencionar que la sustitución del combustóleo por gas natural en las plantas termoeléctricas, el incremento en la construcción de las plantas de ciclo combinado y su participación en la generación nacional de electricidad en los últimos años han contribuido a que el aumento de este factor no sea mayor. Sin embargo, sería recomendable brindar un mayor apoyo a proyectos de eficiencia energética en el sector eléctrico, así como a proyectos de generación eléctrica empleando energías renovables.

La industria siderúrgica y la industria del cemento en México, dos de las más intensivas del sector industrial, incrementaron su consumo de energía primaria a un ritmo promedio anual del 3.4% y 3.9% respectivamente entre 1970 y 1995. Sin embargo, las variaciones en la composición de su producción y en sus procesos así como la introducción de mejoras tecnológicas dieron lugar a una reducción en el CEE<sub>p</sub> del 26% para la industria siderúrgica y del 7.5% para la industria del cemento.

En particular, los cambios tecnológicos que mejoraron la eficiencia energética en la industria siderúrgica mexicana son: la completa sustitución de los hornos de hogar abierto, el rápido crecimiento de la colada continua, un mayor empleo de los gases de salida del alto horno y de los hornos de coque en la cogeneración y la implementación de innovaciones tecnológicas en las plantas de hierro de reducción directa (HRD). En cuanto a los cambios estructurales que favorecieron la reducción del CEE<sub>p</sub> es el incremento del empleo de la chatarra y el aumento en la fabricación de los productos laminados en caliente, principalmente planchas ultradelgadas que anteriormente eran obtenidos en la laminación en frío. Es importante mencionar que la producción de HRD en México ha aumentado considerablemente en los últimos años, por lo que a pesar del incremento de la participación de los hornos eléctricos de arco (tanto en plantas integradas como en semi integradas), el material introducido en estos hornos es principalmente HRD en lugar de la chatarra.

---

<sup>250</sup> La sustitución del coque en la industria siderúrgica se debió a un incremento en la producción de hierro de reducción directa que utiliza gas natural como combustible y como agente reductor.

De acuerdo a las características de producción, el potencial técnico de mejoramiento de eficiencia energética de la industria siderúrgica mexicana en 1995 fue del 35% respecto a las tecnologías de la "mejor práctica".

Lo óptimo para la industria siderúrgica mexicana sería mejorar la eficiencia tanto energética como del uso de materiales incrementando el empleo de la colada continua y la laminación en caliente de planchones delgados en los procesos de fabricación, y aumentando el uso de la chatarra como materia prima en los hornos eléctricos de arco. Sin embargo, en México no se pronostica que crezca rápidamente el consumo de chatarra debido a la desventaja económica que representa su comercialización ya que gran parte de ésta se importa. Por otro lado, el HRD en México se fabrica ampliamente debido a que cuenta con tecnología propia para producirlo. Es importante mencionar que el mercado requiere de aceros especiales con mayor valor agregado, generalmente este tipo de aceros se producen con aleaciones metalúrgicas con diversos elementos. Una desventaja de esto es que en el término de su vida útil, al tratar de reciclar este tipo de chatarra obsoleta resulta difícil separar las impurezas y aprovechar su contenido de acero.

Las principales medidas observadas en plantas específicas de otros países permiten recomendar las siguientes mejoras tecnológicas para la industria siderúrgica mexicana. De manera general, se recomienda la instalación del control automatizado que mejore la medición y la productividad de los procesos, el buen mantenimiento preventivo y la implementación de controladores variables de velocidad para ventiladores y bombas. Para etapas particulares, en la producción de arrabio se sugiere aumentar la recuperación del calor de los gases de alto horno para la cogeneración; en la producción de acero primario, la recuperación del calor sensible de los gases de desecho del convertidor básico al oxígeno; en los hornos de arco eléctrico, se recomienda el precalentamiento de la chatarra utilizando el calor de desecho de otras etapas, la práctica de la escoria espumosa que incrementa el intercambio de calor en el horno y los quemadores de oxígeno y combustible como fuentes secundarias de calor; en la etapa de colada, la conexión directa de la colada continua con el laminado en caliente.

En cuanto a la industria cementera mexicana, varios cambios tecnológicos favorecieron la reducción del CEE<sub>p</sub>: la ampliación de la capacidad instalada a través de la construcción de nuevas plantas, el cierre de las plantas obsoletas y la modernización de las ya existentes con sistemas de precalentamiento y precalcificación para los hornos con proceso seco, sistemas automatizados del proceso de producción, sistemas de molienda más eficientes y equipos para el control de emisiones contaminantes. Sin embargo, el principal cambio tecnológico que favoreció esta disminución fue la sustitución casi completa de los hornos de proceso húmedo por hornos de proceso seco equipados con precalentadores y precalcificadores. En cuanto a los cambios estructurales, la producción de cementos Portland Puzolana se incrementó lo cuál favorece a la reducción de requerimiento de clínker. Por otro lado, es importante mencionar que en la industria

cementera mexicana se han utilizado llantas y aceites usados como sustitutos de los combustibles fósiles en los hornos de cemento. Esta medida ha permitido recuperar energía de estos residuos industriales y reducir el problema de la disposición ambientalmente adecuada de éstos. Sin embargo, la falta de normalización ambiental, de incentivos fiscales para la recolección, transporte y consumo así como los altos costos de transporte no han promovido un incremento del empleo de éstos en los hornos de cemento.

A pesar del incremento de la participación de los cementos Portland puzolánicos en la producción nacional y los cambios tecnológicos implementados en sus procesos de fabricación, existe un potencial técnico de mejoramiento de la eficiencia energética para la industria del cemento en México respecto a la "mejor práctica", en 1995 este potencial se estimó de un 27%.

Dentro de las medidas de ahorro de energía más efectivas para la industria del cemento se encuentra la sustitución de los hornos largos de proceso húmedo y de proceso seco por hornos con precalcinadores y precalentadores; sin embargo, esta medida resulta muy costosa y es aplicada si su costo de inversión se justifica no sólo por el ahorro de energía futuro sino también por un notable incremento de la producción. En México, sólo una planta emplea el proceso húmedo, sin embargo, la empresa que posee esta planta decidió construir una nueva y reducir la producción de la planta de proceso húmedo.<sup>251</sup>

De acuerdo a la bibliografía consultada, las medidas que tienen un menor periodo de recuperación son: la instalación del control automatizado en la planta, el control de la carga en los molinos de bolas y la instalación de variadores de velocidad en los ventiladores.

Por otro lado, se espera que con el proyecto de la construcción de una planta cementera a lado de una planta siderúrgica se emplee la escoria granulada de alto horno para la fabricación de cementos de escoria de alto horno. El incremento del empleo de estos residuos industriales y la puzolana como sustitutos para la materia prima es una de las mejores opciones de ahorro de energía y mitigación de GEI ya que reduce la cantidad de clínker requerido.

Finalmente, al comparar las industrias analizadas con los países principales productores de acero y de cemento respectivamente, se observó que la industria mexicana del cemento es muy eficiente ya que su capacidad instalada se encuentra constituida por plantas, casi en su totalidad, de proceso seco; son de gran capacidad y han sido construidas o modernizadas con tecnologías muy eficientes; además de la alta participación de los cementos Portland puzolánicos en la producción nacional. Las industrias del cemento más eficientes son la de Japón y la de Alemania, las cuáles cuentan con una alta participación de hornos con precalentadores y precalcinadores, así como una notable producción de cementos de escoria de alto horno. Por otro lado, el alto CEE<sub>p</sub> de

la industria cementera de EUA, China e India se debe a que su capacidad instalada está formada por una alta proporción de hornos largos vía húmeda u hornos verticales.

Por otro lado, la principal diferencia de la industria siderúrgica mexicana respecto a otros países es su alta producción de HRD. Esto ocasiona que su CEE<sub>p</sub> no sea tan bajo a pesar de las mejoras tecnológicas que ha llevado a cabo. Las industrias siderúrgicas más eficientes son las de Alemania, Francia y Japón las cuáles desde principios de los ochentas cerraron las plantas que empleaban hornos de hogar abierto y permitieron una rápida penetración de la tecnología de colada continua. Mientras que la industria siderúrgica estadounidense a pesar de emplear una gran cantidad de chatarra en la producción de acero, la penetración de nuevas tecnologías ha sido lenta.

Es importante mencionar que esta tesis sólo evalúa el potencial técnico de ahorro de energía, sin embargo, para la implementación de las medidas de eficiencia energética recomendadas es muy importante mostrar los beneficios económicos que se lograrían y estimar cuáles medidas tienen un mayor ahorro de energía o una mayor mitigación de los GEI al menor costo para el sector industrial mexicano. Sería de gran utilidad que en un trabajo posterior, se pudieran retomar las medidas recomendadas por esta tesis, calcular el potencial económico de estas industrias y presentar una curva de costos incrementales que señale las medidas que requieran menores costos de inversión, que presenten periodos de retorno cortos con el mayor ahorro de energía o mayor reducción de GEI posible.

Otro trabajo futuro sería la realización del análisis del consumo de energía y comparaciones internacionales para otras industrias intensivas del sector industrial mexicano, como son: la industria petroquímica, la industria química, la industria del aluminio y la industria de fertilizantes, entre otras; así como la actualización de los datos del consumo específico de energía de la mejor práctica. Esto permitirá tener una mayor información y más detallada del sistema energético del sector industrial que proporcionen más bases para la toma de decisiones en la política nacional e internacional de Cambio Climático, así como para la transferencia de tecnología, los acuerdos bilaterales o la implementación conjunta para este sector.

Debido a que el principal obstáculo para proponer medidas precisas de eficiencia energética y de mitigación de gases de efecto invernadero para el sector industrial que se ha presentado ha sido la falta de información de los patrones de consumo de energía en el sector industrial. Para poder realizar estudios a un nivel más desagregado y proponer medidas de mejoramiento de eficiencia energética más específicas sería recomendable contar con información acerca del consumo de energía clasificados por usos finales o por procesos.

---

<sup>251</sup> La nueva planta inició operaciones en 1997, cuenta con una capacidad instalada de 900 millones de toneladas de cemento anuales empleando un horno de proceso seco con precalentadores y precalcinadores.

## Anexo I

### Glosario de términos

Arrabio se le conoce al metal caliente producido principalmente en el alto horno, o en el proceso de fusión directa (Corex).

Calcinación: acción a través de la cuál la caliza y el carbonato de magnesio liberan bióxido de carbono dejando cal libre y óxido de magnesio.

Cementos mezclados se refieren a los cementos Portland combinados con materiales naturales (puzolanas) o con productos secundarios industriales (cenizas volantes o escoria granulada de alto horno) que tiene propiedades hidráulicas.

Ceniza volante es un producto de la combustión de carbón pulverizado en calderas industriales o de generación de electricidad.

Clínker es el material sintético granular, resultante de la cocción a una temperatura de 1673 K (1400° C) de materias primas de naturaleza calcárea y arcilloferruginosa, previamente trituradas, proporcionadas, mezcladas, pulverizadas y homogeneizadas. Esencialmente el clínker está constituido por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos cálcicos.<sup>1</sup>

Energía de uso final: mide la energía utilizada por cada aplicación final. Se obtiene a través de encuestas para conocer el consumo de energía actual y los datos más importantes del equipo empleado (frecuencia de uso, tamaño, etc.) en hogares, edificios, vehículos e incluso para complejos procesos industriales.

Energía final: es la energía comprada por los usuarios finales, tomando en cuenta las conversiones a otra forma de energía que se lleva a cabo dentro de las instalaciones del usuario final. La manera más fácil de contabilizarla es:

$$\text{Energía final} = \text{Energía comprada} - \text{energía consumida para la conversión dentro de la planta} + \text{energía producida dentro de la planta}$$

Energía neta comprada: es la cantidad neta comprada por los usuarios de un mismo sector. Es la que generalmente se encuentra reportada en las estadísticas nacionales. Sin embargo, no incluye la energía que vende a otros usuarios, por ejemplo, la electricidad autogenerada a

---

<sup>1</sup> NOM-C2-1986

---

vende a la red eléctrica, subproductos como desechos o gas de alto horno en la industria siderúrgica, etc.

**Energía neta disponible:** es la cantidad de energía actualmente disponible por el usuario, a diferencia de la energía neta comprada, incluye cambios en inventarios y la energía primaria producida por los usuarios, por ejemplo, el bagazo de caña en la industria azucarera.

**Energía primaria:** es aquella que proviene de fuentes primarias de energía, es decir, aquellas que no han pasado por ningún proceso de transformación, como son: el carbón, el petróleo, el gas (asociado y no asociado), la biomasa (leña, bagazo de caña) y las energías renovables (la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica y la hidroenergía). La demanda de energía primaria no puede ser medida, debe ser calculada tomando en cuenta los flujos de energía en el sector energético, a partir del consumo final de energía o de la energía neta comprada. Generalmente el cálculo consiste en sumar al combustible empleado el consumo de electricidad afectado por la eficiencia de conversión de las plantas generadoras (entre 30 y 40%).

**Energía útil:** es la fracción de la energía realmente empleada en un proceso respecto a la energía de entrada o consumida en dicho proceso. Esta diferencia se debe a pérdidas de energía hacia los alrededores, en reacciones químicas, caídas de presión y otras irreversibilidades.

**Ganga:** es la parte de la roca extraída que no tiene valor.

**Hierro de reducción directa,** también conocido como hierro esponja o hierro briqueteado en caliente (HBC), es producto de la reducción del mineral de hierro en su estado sólido a temperaturas menores de 1000°C que se lleva a cabo en procesos como el HYL o el Mildrex.

**Índice de volumen físico:** es la proporción de la producción en un sector en un año dado y la producción en el mismo sector referido a un año base. Este índice es parcialmente físico y parcialmente económico, la producción física es indexada usando factores de ponderación económicos para tomar en cuenta las diferencias en el valor. A este índice también se le conoce como índice de producción.

**Oxidación:** proceso en el cuál se tiene una pérdida de electrones.

**Poder de paridad de compra (ppc)** se define como la cantidad de unidades monetarias de un país que se requiere para comprar cierta cantidad de bienes o servicios en su mercado doméstico respecto a lo que se podría comprar con un dólar en el mercado estadounidense, se emplea para cambiar los montos de cierta moneda a otra moneda de referencia.

Producción bruta es la medida económica más extensiva cuantificada para la producción manufacturera, incluye el valor de los productos y subproductos fabricados (excluyendo productos intermedios), el valor de recibos (servicios prestados a otros, trabajos realizados por otros del material proporcionado por ellos), el valor de otros ingresos (ventas de electricidad), cambio de inventarios y un balance neto de los bienes vendidos en la misma condición de los bienes comprados.

Puzolanas es un material silíceo o sílico-aluminoso, que en sí posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes. Dentro de las puzolanas naturales se encuentran las tobas, rocas vítreas, diatomitas, pumicitas y las cenizas volcánicas.

Reducción: proceso en el cuál se tiene una ganancia de electrones.

Valor agregado: es el diferencial de unidades monetarias entre el costo de las entradas (insumos) y el precio de las salidas (productos), incluyendo los servicios.

Valor calorífico superior: mide el calor liberado en la combustión de combustibles en caso de que el agua formada químicamente esté condensada.

Valor calorífico inferior: mide el calor liberado en la combustión de combustibles en caso de que el agua formada químicamente esté en estado gaseoso.

Valor de la producción: es la suma total del valor de los bienes y servicios producidos por una sociedad, se incluyen los artículos para autoconsumo así como los bienes que intercambian distintas unidades de producción. La diferencia entre el valor de la producción y el valor agregado es que el primero incluye las compras que se hicieron a otros productores de bienes y servicios para llevar a cabo su proceso productivo.

## Anexo II.

### Abreviaturas

AH	Alto horno
AHMSA	Altos Hornos de México, S.A.
AVE-PDM2	Método de descomposición paramétrica (2) empleando índices de promedio simple
BNE	Balance Nacional de Energía
CBO	Convertidor básico al oxígeno
CEE	Consumo específico de energía
CEE <sub>p</sub>	Consumo específico de energía primaria
CFE	Comisión Federal de Electricidad
FEC	Factor de emisión de carbono
FUMOSA	Fundidora Monterrey, S.A.
GAH	Gas de alto horno
GAN	Grupo Acerero del Norte
GEI	Gases de efecto invernadero
GHC	Gas del horno de coque
HEA	Horno de arco eléctrico
HHA	Horno de hogar abierto
HRD	Hierro de reducción directa
HYLSA	Hojalata y Lámina, S.A.
IISI	Instituto Internacional de hierro y acero (siglas en inglés, <i>International Iron and Steel Institute</i> )
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INEDIS	Red Internacional de Base de datos de Energía para el Sector Industrial (siglas en inglés, <i>International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector</i> )
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés, <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
LBNL	Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (siglas en inglés)
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIB	Producto Interno Bruto
ppc	Poder de paridad de compra
R.F.A.	República Federal de Alemania

R.D.A.	República Democrática de Alemania
SICARTSA	Siderúrgica Lázaro Cárdenas, Las Truchas, S.A.
SCN	Sistema de Cuentas Nacionales
TAMSA	Tubos de Acero de México, S.A.

## Bibliografía

- Ablinger, A., 1987, "Medidas para la reducción del coste de la energía en fábricas de cemento con accionamientos de velocidad variable", en *Cemento y Hormigón*, España, p. 228.
- Aguilar, A., *Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo*, México, p. 18-22.
- Andersen, K., 1975, "Kiln selection" en *Energy Conservation Potencial in Cement Industry Paper no. 26*, p. 194.
- Ang, B.W., 1995, "Decomposition Methodology in industrial energy demand analysis" en *Energy*, vol. 20, no. 11, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 1081-1095.
- Anónimo, 1985, "Ahorro de energía en la molienda al usar separadores 'Cyclopol' de alto rendimiento", en *Cemento y Hormigón*, no. 622, septiembre, p. 796.
- Anónimo, 1998, "Técnica de molienda para la fabricación de cemento – Desarrollo, estado actual y perspectivas", en *ZKG Internacional*, no. 2, enero, p. 58.
- Anónimo, 1998b, "Indian cement faces some challenges, but potential for growth still massive", en *International Cement Review*, junio, p.42.
- APASCO, 1994, *Informe Anual*, México, D.F.
- Baro, E., 1997, "México: entre los primeros 15 del mundo", en *Acero North American Steel Journal*, Vol. 2, no. 3, marzo, p.p. 18-20.
- Bentrup, K., 1994, "Sistemas expertos en la Industria del Cemento", en *World Cement*, agosto.
- Birch, E., 1990, "Energy savings in Cement Kiln Systems", en *Energy efficiency in the Cement Industry*, J. Sirchis (editor), Elsevier Applied Science, Gran Bretaña, p. 120-122.
- Bo, A., 1990, "District heating based on waste heat from clinker cooler", en *Energy efficiency in the cement industry*, J. Sirchis (editor), Elsevier, L.T.D., Gran Bretaña, p.73-77.
- Brito, J., 1999, "Insuficiente el Plan de Ajuste de Altos Hornos: Inversionistas", en el periódico *Excelsior*, sábado 10 de julio de 1999, año LXXXIII, tomo IV, sección Financiera, p. 1.
- Byland, P., 1993, "The North American cement industry: a foreign investor's perspective, developed and developing world economies", en *World cement*, junio, p. 8-12.
- CEMBUREAU, 1997, *World Cement Directory 1996*, Bruselas, Bélgica.
- Cembureau, 1997, "World cement market in figures 1913/1995" en *World Statistical Review no. 18/Special edition*, Bélgica, p. 157
- CEMEX, 1994, *Informe Anual*, Anuario, México, D.F., p. 34-38
- CDIAC, 'National CO2 Emissions from Fossil-fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1996', CIDAC webpage: <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/nation96.ems>, septiembre, 1999.
- Chang, T., 1994, "Successful operation of the world's only 5000 tpd short rotary kiln" en *World Cement*, septiembre, Inglaterra, p. 9-11.
- CFE, 1995, COPAR 1994, México, D.F., p. 1.8

- CIEEDAC, *Development of Energy Intensity Indicators for Canadian Industry 1990-1996*, Universidad de Simon Fraser, Vancouver, Canadá.
- CONAE, 1995, *Perfiles energéticos de la industria química y alimenticia*, México, D.F.
- Conroy, G., 1994, "Modern Cement Plant Design with a view to efficiency and the environment", en las Memorias de la Conferencia de IEEE 1994, que se llevó a cabo del 30 de mayo al 2 de junio de 1994 en Washington, E.U.A., p. 370- 383.
- Cortés, F., 1995, *Sesión de llantas usadas. Taller sobre minimización de residuos y producción más limpia en América Latina y el Caribe*, INE, México.
- COWI consult, 1993, *Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Final Report*, febrero, p.50.
- Da Silva, J, et. al., 1993, "Emission and control of pollutants in the cement industry" en *Third International Conference on waste management in the chemical and petrochemical industries*, octubre, Brasil, p. 365.
- Eberle, A., et.al., 1995, "Tecnología de RD Corex plus –La base de la siderúrgica del futuro –", en el Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA – 36, 17-20 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia.
- Ehardt, C., 1989, "Residuos industriales para la fabricación del cemento" en Memorias de las III Jornadas Colombianas del Cemento que se llevaron a cabo del 19 al 22 de julio en Boyaca, Colombia, ICPC, Colombia, p. 4
- Elizalde, A., et. al., 1998, "Consumo de energía en la industria siderúrgica mexicana" en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. 1, no. 1, p. 23-34.
- Endres, G., "Reducción de emisiones y consumo de energía en hornos rotativos, por medio de una tecnología de punta de combustión" en *Cemento y Hormigón*, no. 718, p. 413-421.
- Farla, J., et.al., 1995, "Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using physical production data", en *Energy policy*, vol. 25, no. 7-9, p.746
- Fernández, R., 1999, "Chatarra: la fuerza del acero", en *Canacero, Suplemento Especial*, 2ª edición, 11 de marzo de 1999, pp. 4.
- Flores, J., 1994, "Lubricantes usados", en *Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos*, realizado en noviembre de 1994 en México, D.F., p. 1-12
- Fog, M., K. Nadkarni, 1983, *Energy Efficiency and Fuel substitution in the Cement Industry with Emphasis on Developing Countries*, documento técnico del Banco Mundial, Banco Mundial, Washington, E.U.A., p. 50.
- Guardiota, C., et. al., 1994, "Summit control system for Cementos de Chihuahua", en *World Cement*, abril, p.32
- Hattori, M., "La planta integrada del futuro", en el Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA – 38, p. 7.
- Holderbank, 1993, *Present and Future use of energy in the cement and concrete industries in Canada*, Ontario, Canadá, p.7.
- Holderbank, *Curso de Cemento, Tecnología del Proceso, uso de combustibles alternos*, México, p, 1 – 16.
- Huntha, R., 1985, "Waste fuel survey report", en *Rock products*, abril, p. 40-43.
- HYLSA, 1998, "HYL plants and projects in review" en *HYL report, the Direct Reduction Quarterly*, vol. 12, no. 1, p. 4-6

- HYLSA, 1999, "The HYL HYTEMP EAF minimill" en *HYL report, the Direct Reduction Quarterly*, vol. 13, no. 2, p. 4-10.
- ICR, 1996, The global cement report, en *International Cement Review*, segunda edición, Gran Bretaña, p. 151-154.
- IEA, 1991, *Energy balances of non OECD countries*, Paris, Francia.
- IISI y UNEP, 1997, *Steel Industry and the Environment, Technical and Management Issues*, Brichaut, F. (editor), Bélgica, p.11-28
- IISI, 1999, *Steel Statistical Yearbook 1999, 'Largest steel producing countries 1992 to 1998'*, International Iron and Steel Institute web site: [http://www.worldsteel.org/trends\\_indicators/](http://www.worldsteel.org/trends_indicators/) .
- ILAFA, 1995, "Reducción Directa Hoy: Crecimiento con Paso Firme", en *Siderúrgica latinoamericana*, ILAFA, no. 426, p.p. 2-14.
- ILAFA, 1996, "Innovaciones tecnológicas: el futuro es ahora", en *Siderúrgica latinoamericana*, ILAFA, no. 449, p.p. 44-51.
- ILAFA, 1997, "Nuevo siglo, el futuro de la empresa siderúrgica" en *Acero latinoamericano*, enero-febrero, no. 440, p. 13-21.
- Iron and Steel making, 1993, "Electric Arc Furnace Roundup - Mexico" in *Iron and Steel making*, vol. 20, no. 5, p. 42-43
- Iron and Steel making, 1998, "Electric Arc Furnace Roundup - Mexico" en *Iron and Steel making*, vol. 25, no. 5, p. 28-29.
- INEGI, 1997, *Sistema de Cuentas Nacionales de México, Cuentas de Bienes y Sservicios 1988-1995*, Tomo II, México, p. 81
- INEGI, 1997, *La industria siderúrgica en México edición 1996*, México, D.F., p. 3-35
- IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, p. 1.6
- Kreft, W., 1990, "Ecological aspects of cement – Environmentally oriented application of technology as a contribution to climatic protection", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 5, mayo, p. 123-127.
- Kresiberg, A., G. Kapoor, 1990, "Advancements in precalciners and preheaters", en *World Cement*, p. 89 – 93.
- Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999, *International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector*, Berkeley, California, Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBID-2297).
- Lestani, M., et.al., 1998, "El proceso de laminación continua con soldadura" en *Siderúrgica Acero y Desarrollo*, vol. IX, no. 61, noviembre, pp. 21-26.
- Levine, P., 1990, "Expert systems for kiln control and heat economics" en *World Cement*, abril, p. 135.
- McGrath, B., 1993, "Using lubricating oil as a fuel for cement kilns" en *World Cement*, marzo, p. 19-22.
- Marciano, E., et. al., 1997, "Looking green", en *World Cement*, vol. 28, artículo 4, p. 84.
- Martínez, C., 1999, "La alianza y refinanciar deudas con bancos, los grandes retos de AHMSA" en el periódico *La Jornada*, jueves 12 de agosto de 1999, sección Economía, p. 19.
- McAloon, T.P., 1993, "Hylsa aims high with Monterrey modernization", en *Iron & Steel Magazine*, vol. 20, no. 7, p. 44-47.

- Mendoza, C., 1995, "Fuentes de metálicos para la siderurgia: Desarrollo actual de procesos de reducción directa y reducción de fusión", en *Siderúrgica latinoamericana*, ILAFA, no. 426, octubre, p. 15-29.
- Meunier, M.Y., et.al., 1984, *Energy Efficiency in the Steel Industry with Emphasis on Developing Countries*, World Bank, technical paper no. 22, USA, pp. 13-21.
- Meza, L., 1995, "Estudio de la problemática del manejo de los aceites usados generados por diferentes medios de transporte", en *CENAPRED*, México, julio, p. 51.
- Michard, D., 1988, "Using kilns for incineration", en *Rock products*, julio, p. 80 – 82.
- Mullick, A., et. al., 1986, "Evaluation of Pozzolan activity and its impact on specification of blended cement", en el *8º Congreso Internacional de química de cemento*, Brasil, p. 308-311
- Ostergaard, J., 1982, "Control of a cement kiln by Fuzzy Logic" en *FLS-Review*, no. 67, p. 3-11
- Ozawa, L., 1997, "Demanda de energía en la Industria del Cemento en México y opciones de ahorro: sustitución de combustibles y uso de control difuso para el horno rotatorio de cemento", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., julio, México, D.F., p. 77,81.
- Peray, K.E., 1972, *The Rotary Cement Kiln*, Chemical, Nueva York, p. 85, 107-111, 142-144, 161-163.
- Peikang, R., et. al., "China's cement industry in 1996 and development and development prospects for 1997" en *World cement*, vol. 28, artículo 6, p. 6.
- Phylipsen, G.J.M., et. al., 1998, *Handbook on International Comparisons of Energy Efficiency in the Manufacturing Industry*, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad de Utrecht, Utrecht, Holanda, p. 1-83, 101-113.
- Quintero, R., 1995, "Avances en el proceso HYLIII de Reducción Directa", en el Congreso Latinoamericano de Siderurgia ILAFA – 36, 17-20 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia
- Quintero, R., 1997, "Perspectivas de la automatización en la industria siderúrgica", en el Congreso Latinoamericano de Siderurgia ILAFA – 38, p. 27-30
- Rock products, 1989, "International Cement Review", en *Rock products*, p. 55-78.
- Rosemann, H., P. Künne, 1990, "Operating experience with a new type of burner for rotary kilns", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, Alemania, p. 247-249.
- Rother, W., et. al., 1990, "Selectrion criteria for calciners" en *World Cement*, diciembre, p. 522-523.
- Roy, R., 1998, "Continued growth US cement import" en *International Cement Review*, enero, Gran Bretaña, p. 57-61.
- Rueda, I. (Coordinadora), 1994, *Tras las huellas de la privatización: El caso de Altos Hornos de México*, Siglo veintiuno editores, México, D.F., primera edición, p. 44-49.
- Salomón, A., 1995, "Industria del cemento: pruebas del tiempo", en *Comercio exterior*, México, D.F., p. 823-826.
- Scarnati, Thomas (editor), 1999, "The HYL HYTEMP EAF Minimill" en *HYL report, The Direct Reduction Quarterly*, Vol. XIII, no. 2, p.4-6.
- Schroth, G., 1975, *Energy Conservation Potential in the Cement Industry*, p. 249
- Schwarz, S., et. al., 1990, "Grinding optimisation using high pressure grinding roll and downstream ball mills" en *World cement*, septiembre, p. 385-388.
- Secretaría de Energía, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México, p. 57-58

- Secretaría de Energía, 1997b, *Prospectiva del Mercado de Gas Natural 1997-2006*, México, D.F., p.24-25
- Seebach, M., et. al., 1994, "Designing a cement plant for the most stringent environmental standards" en la 36ª *Conferencia de la IEEE* realizada del 29 de mayo al 2 de junio de 1994 en Washington, E.U.A., p. 323-347.
- Sinton, J., 1996, "Energy Efficiency in Chinese Industry: Positive and Negative Influences of Economic Systems Reforms", tesis doctoral, Universidad de California en Berkeley, Berkeley, E.U.A., p. 55-74.
- Solinis, R., 1984, "25 años de Desarrollo Tecnológico en las acerías eléctricas de América Latina", en el Congreso Latinoamericano de Siderúrgica ILAFA – 25, p. 1-4
- Turley, W., 1995, "Mexican Mammoth" en *Rock products Cement edition*, septiembre, E.U.A., p. 21-25.
- United Nations, 1997, *Iron and Steel Scrap: its significance and influence on further developments in the Iron and Steel industries*, Economic Commission for Europe Steel Series 1997, Nueva York, p.p. 114-156.
- Valera, R., 1998, "Una siderúrgica de cara al mar" en *Acero, North American Steel Journal*, vol. 4, no. 23, noviembre-diciembre, pp. 3-9.
- Warshawsky, J., 1995, "Energy consideration in clinker cooling" en *Energy Conservation Potential in the Cement Industry Paper no. 26*, p. 178-187.
- Worrell, E., et. al., 1995, "Internacional Comparison of Energy Efficiency Improvement in the Cement Industry" en *Proceedings ACEEE 1995 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Washington, D.C., E.U.A., p. 123-134.
- Worrell, E., 1996, *Potentials for Improved Use of Industrial Energy and Materials*, tesis doctoral, Departamento de Sociedad, Ciencia y Tecnología, Universidad de Utrecht, Holanda, p. 11-14.
- Worrell, E. y C. Moore, 1997, "Energy efficiency and advanced technologies in the Iron and Steel industry" en *1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry Proceedings*, Estados Unidos, 11 páginas.
- Worrell, E., L. Price, Nathan Martin, Jacco Farla and Roberto Schaeffer, 1997b, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 727-744.
- Worrell, E., N. Martin y L. Price, 1999, *Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emission Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector*, Lawrence Berkeley National Laboratory Reporte LBNL – 41724, Berkeley, California, E.U.A., p. 5.