



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TENDENCIAS DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA
INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA Y ANÁLISIS DE
LOS CAMBIOS TECNOLÓGICOS**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO
PRESENTA:**

DANIEL CASTILLO GUEVARA

Director de Tesis: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo



CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F., 2010

Dedicado a: Guadalupe y Francisco, mis padres.

Francisco, Julio y Stephanie, mis hermanos.

Adolfo, Gabriela y Sofía, mis abuelos.

A mi familia y amigos.

Lizeth, mi gran amor.

Agradecimientos

A la Dra. Claudia Sheinbaum Pardo por toda su paciencia, apoyo y enseñanzas durante el tiempo de realización de esta tesis, ella es un gran ejemplo de dedicación y profesionalismo.

A la Dra. Leticia Ozawa Meida por sus consejos y ayuda para sacarle el mejor provecho a este trabajo.

Gracias a mis papás por su amor y apoyo en cada momento de mi vida, por educarme, ayudarme a crecer como persona y por el todo el apoyo que me han dado en cada etapa de mi vida y en todas mis decisiones respetándome y amándome.

A mis hermanos por los grandes momentos que hemos vivido juntos, por su ayuda y cariño sincero.

A mis abuelos por sus sabias palabras, por su conocimiento, sabiduría y por todo el gran cariño que siempre me han demostrado.

A toda mi familia, por haberme aportado todos los valores para volverme una persona útil, respetuosa, además de darme su gran cariño y generosidad.

A Lizeth por su apoyo, cariño y por su ejemplo de constancia y humanidad.

A mis compañeros y amigos por la solidaridad y apoyo incondicional que siempre me han demostrado.

Especial agradecimiento al Instituto de Ingeniería por el apoyo de beca otorgado.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a su Facultad de Ingeniería por qué me ha permitido formarme profesional y personalmente en sus aulas, bibliotecas y en todos sus espacios culturales y deportivos.

Agradezco a todas las personas que con su trabajo aportaron una gran ayuda al desarrollo de cada parte de este proyecto.

Gracias a todos los miembros del jurado por la dedicación que tuvieron al revisar este trabajo y gracias por sus valiosas sugerencias para mejorar su contenido.

Y a todos aquellos que de alguna forma contribuyeron en mi formación durante esta etapa, gracias!

Índice de Tablas

Tabla 1. 1. Los principales países/regiones de mayor producción de acero (2007).....	18
Tabla 1. 2. Producción mundial de acero por proceso en 2007.....	19
Tabla 2. 1. Producción de hierro por tecnología.....	28
Tabla 2. 2. Producción de acero por tecnología.....	29
Tabla 2. 3. Producción de algunos terminados por tecnología.....	30
Tabla 3. 1. Consumo de electricidad (final y primaria) de la industria siderúrgica nacional	33
Tabla 3. 2. Cambio del consumo de energía primaria por periodos (tasa de crecimiento anual)	34
Tabla 3. 3. Estructura del consumo de energía por combustibles.....	35
Tabla 3. 4. Consumo específico de energía (GJ/ton)	36
Tabla 3. 5. Cambio en el consumo específico de energía por períodos.....	38
Tabla 4. 1. Fracción de carbono oxidado	47
Tabla 4. 2. Factores de emisión de CO ₂ , incluyendo fracción oxidable (TCO ₂ /TJ)	47
Tabla 4. 3. Factores de emisión CH ₄ y N ₂ O para industria siderúrgica	47
Tabla 4. 4. Factores de emisión CH ₄ y N ₂ O para generación eléctrica (Kg/TJ).....	48
Tabla 4. 5. Factor de emisión para generación eléctrica (Kg/TJ).....	49
Tabla 4. 6. Emisiones de CO ₂ equivalente de la quema de combustibles de la industria siderúrgica mexicana (Gg).....	50
Tabla 4. 7. Tasa de crecimiento anual de las emisiones de GEI por periodo.....	51
Tabla 4. 8. Emisiones de gases de efecto invernadero por gas para 2006 (Gg de CO ₂ equivalente).....	51
Tabla 4. 9. Emisiones por unidad de producto.....	54
Tabla 4. 10. Tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones de GEI por unidad de producto (Ton CO ₂ eq./Mton).....	55
Tabla 5. 1. Consumo específico de la mejor práctica para diferentes procesos presentado en Worrell et al. (2008).....	58
Tabla 6. 1. Cambio en el consumo de energía primaria de la industria siderúrgica mexicana.....	63
Tabla 6. 2. Cambio en emisiones de CO ₂ de la industria siderúrgica mexicana	65

Índice de Figuras

Figura 1. 1. Procesos de producción del acero.....	6
Figura 1. 2. Procesos de producción del hierro y el acero con mayor detalle	7
Figura 1. 3. Actividades previas a la producción de hierro en el alto horno.....	8
Figura 1. 4. El Alto Horno	10
Figura 1. 5. Zonas del Alto Horno.....	12
Figura 1. 6. Esquema Básico del BOF	13
Figura 1. 7. BOF	14
Figura 1. 8. Arco eléctrico.	15
Figura 1. 9. HEA	16
Figura 1. 10. Laminado en caliente y en frío	17
Figura 1. 11. Producción mundial de acero crudo	18
Figura 2. 1. Distribución geográfica de la industria siderúrgica nacional	24
Figura 2. 2. Cambios en el PIB nacional, industrial, manufacturero y de la industria siderúrgica.....	25
Figura 2. 3. Cambios en la producción, exportación e importaciones.....	25
Figura 2. 4. Comportamiento del PIB de la industria siderúrgica nacional	26
Figura 2. 5. Cambios en la producción física de la industria siderúrgica nacional.....	26
Figura 2. 6. Cambios tecnológicos en la siderúrgica nacional.	27
Figura 3. 1. Consumo de energía de la industria siderúrgica nacional	32
Figura 3. 2. Consumo específico de energía primaria de la industria siderúrgica nacional.	37
Figura 4. 1. Cambios en los Gases de Efecto Invernadero de datos de Núcleo de Hielo y actuales.	42
Figura 4. 2. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte	43
Figura 4. 3. Emisiones de GEI en el planeta	45
Figura 4. 4. Emisiones de GEI de la industria siderúrgica nacional (Gg de CO ₂ eq.)	50
Figura 4. 5. Total de emisiones por unidad de producto.....	52
Figura 4. 6. Emisiones por unidad de producto	53
Figura 6. 1. Comparación entre el SECp y el SECbp	64

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA	4
1.1 Origen.....	4
1.2 Procesos de producción.....	6
1.2.1 <i>Fabricación de hierro</i>	7
1.2.1.1 <i>El alto horno para fabricación de hierro</i>	7
1.2.1.2 <i>Fabricación de hierro de reducción directa (HRD)</i>	11
1.2.2 <i>Fabricación de acero</i>	13
1.2.2.1 <i>Hogar abierto</i>	13
1.2.2.2 <i>El horno básico de oxígeno (BOF)</i>	13
1.2.2.3 <i>Horno de Arco eléctrico</i>	14
1.2.3 <i>Refinación secundaria</i>	16
1.2.4 <i>Colada</i>	16
1.2.4.1 <i>Por lingotes</i>	16
1.2.5 <i>Laminación</i>	16
1.2.6 <i>Acabado</i>	17
1.3 <i>La industria siderúrgica en el mundo</i>	17
CAPÍTULO 2. LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO	21
2.1 <i>Historia</i>	21
2.2 <i>Producción e importancia económica de la industria siderúrgica 1970-2006</i>	24
CAPÍTULO 3. CONSUMO DE ENERGÍA DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA, 1970-2006	31
3.1 <i>Consumo de energía</i>	31
3.2 <i>Consumo específico</i>	35
CAPÍTULO 4. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA, 1970-2006	40
4.1 <i>Efecto invernadero y cambio climático global</i>	40
4.2 <i>Emisiones de GEI de la industria siderúrgica</i>	46
4.3 <i>Estimación de emisiones de GEI del consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana</i>	46
4.4 <i>Emisiones por unidad de producto</i>	51
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LOS CAMBIOS EN EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LAS EMISIONES	56
5.1 <i>Metodología</i>	56
CAPÍTULO 6. RESULTADOS	62
6.1 <i>Resultados para energía</i>	62
6.2 <i>Resultados para emisiones</i>	64
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS	70

INTRODUCCIÓN.

La industria siderúrgica es fundamental en la economía moderna. El acero está presente de muchas maneras que benefician todos los ámbitos de la vida diaria. Está en hospitales de todo el mundo, en los sistemas farmacéuticos que elaboran medicamentos y en el equipo de emergencia que presta ayuda médica urgente.

El acero juega un rol fundamental para ayudar a que todos tengan acceso al agua potable. Desde los tanques de almacenamiento de lluvia hasta las bombas y la compleja infraestructura de tubería, el acero es parte del proceso de recolección, purificación y entrega del agua. El acero es parte de cada paso del proceso de suministro de alimentos. El cultivo, la fabricación, la preservación y la entrega no serían posibles sin el acero. El uso del acero también da la tranquilidad de que el alimento en la lata que compramos en la tienda es tan fresco y nutritivo como el día que fue empacado.

Cada vez que se prende un aparato eléctrico se está usando acero, aceros de alta tecnología son usados para crear la energía, los cables que transportan la electricidad están hechos de acero. También es usado para crear energía renovable, incluyendo celdas de combustible de hidrógeno, turbinas de viento y paneles solares.

El acero contribuye a la salud del planeta de diferentes maneras. Los vehículos de acero ligeros protegen y minimizan la cantidad de combustible que se utilizan. Pero la contribución más importante del acero al medio ambiente es que es infinitamente reciclable. El acero nos provee las soluciones de transporte, ya que mueve rápida, eficiente y de manera económica.

Las soluciones de innovación en el acero son fundamentales para encontrar el crecimiento en las necesidades de confort de la humanidad. El acero es uno de los materiales más sustentables en la construcción. Ya que es de larga duración, versátil, resistente a temblores y 100 por ciento reciclable.

La industria siderúrgica nacional ha sido fundamental en el desarrollo del país. En el año 2006 representó el 0.7% del Producto Interno Bruto (PIB) Nacional, el 2.9% del PIB industrial y el 3.8% del PIB manufacturero. Esta proporción es mayor que la que se tenía en 1970, cuando representaba el 0.6%, 2.4% y 3.2% respectivamente (INEGI, 1996).

Entre 1970 y 2006, la industria siderúrgica nacional sufrió diversos cambios, pasó de una industria estatal a una industria privada. Dejando en manos de la industria privada a las principales acereras del país. El proceso de venta dejó a las empresas paraestatales en un precio muy por debajo de su valor real, lo cual fue aprovechado por los inversionistas para

comprar empresas que contaban con un buen nivel de producción, además de que se contaba con mano de obra calificada que era continuamente capacitada como un plan de mejora por parte de la administración gubernamental.

Sin embargo, después de la privatización, la industria siderúrgica mexicana se modernizó y debido a la apertura comercial que ocurría en el país, hubo mejora de procesos que la convirtieron en una industria competitiva.

Esta tesis analiza la tendencia del consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la industria siderúrgica nacional y muestra como la producción de acero creció en 288.4%, pero el consumo específico de energía disminuyó en 45.1%.

Este aumento en la eficiencia del consumo de energía fue producto de una variedad de cambios tecnológicos en todas las etapas de fabricación del acero, aumentando la producción los hornos más eficientes y dejando de usarse los procesos que consumían una mayor cantidad de energía por unidad de producto elaborado. Entre los cambios que se hicieron, esta la completa desaparición del horno de hogar abierto, para dar paso al crecimiento de la producción por el horno básico de oxígeno y el de arco eléctrico, así como el aumento de la reducción directa y disminución del alto horno para la producción de hierro y, finalmente, en los procesos secundarios la utilización casi por completo de la colada continua, dejando de lado la colada por lingotes.

Para analizar con más detalle estos cambios, se utiliza una metodología de descomposición de los índices de cambio. De esta forma, el consumo de energía primaria del sector industrial se analiza desagregando en actividad, estructura y eficiencia energética, mientras que, en el estudio de las emisiones de bióxido de carbono se examinaron además de las variables mencionadas, los factores de emisión de los combustibles empleados y la mezcla de estos en este sector y en la generación de electricidad.

Los resultados muestran que de haberse mantenido constantes la producción y la estructura de producción al nivel que registró en 1970, la eficiencia hubiera hecho disminuir el consumo de energía en 90%.

Esto implica un avance sumamente significativo, que explica porqué la siderurgia nacional sigue siendo una de las principales del mundo, al estar en el lugar número 15.

Para aumentar aun más la eficiencia, la mejor opción es aumentar el reciclamiento del acero para que la chatarra represente una proporción mayor como materia prima en la producción. Aunque en nuestro país es un problema, ya que en México el reciclaje de chatarra es poco y la chatarra es cara, ya que es en gran medida importada.

Esta tesis se divide en ocho capítulos. Después de esta introducción, en el primer capítulo se expone la historia de esta industria, los procesos de producción tanto de hierro como de acero, además de hacer una revisión de la industria siderúrgica en el mundo. En el capítulo dos se describe a la industria siderúrgica en México, la historia, la producción e importancia de la industria siderúrgica en el desarrollo del país. En el tercer capítulo se

analiza al consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana, además de que también se analiza al consumo específico de energía, ambos en todo el periodo de 1970 a 2006. En el cuarto capítulo se estudian las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria siderúrgica mexicana en el periodo 1970-2006, se describe brevemente al efecto invernadero y al cambio climático global, se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero del consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana y las emisiones por unidad de producto. En el capítulo cinco se expone la metodología para evaluar los cambios en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂. En el capítulo seis se describen los resultados obtenidos en la realización de la tesis, analizándolos y describiéndolos para hacer más clara la información que se trabajó en los capítulos anteriores. En el séptimo capítulo se exponen las conclusiones y el por qué se dan los valores obtenidos en la industria siderúrgica nacional en el periodo de estudio que comprende a los años de 1970 hasta el 2006.

CAPÍTULO 1.

LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

En el capítulo se presenta un panorama histórico de la industria siderúrgica en el mundo, para dar una visión amplia de cómo se formó la industria en cuestión, además se describen los procesos de producción tanto de hierro como de acero, lo cual es fundamental para entender el consumo de energía y las emisiones, así como la metodología de análisis, por último se hace una revisión de la industria siderúrgica en el mundo, para poner en contexto a la industria siderúrgica mexicana.

1.1 Origen

Los aceros son aleaciones de hierro con concentraciones máximas de 2.11% en peso de carbono. El acero debe su nombre a su dureza. La voz existía en latín: "aciarium", derivada de "acies" (filio) con la raíz "ac" que marca la idea de "punta" y de "punzante". Muchas palabras contienen este radical: "agudo", "ácido", "acre", "acerbo" (Vicente, 2009). El carbono es el elemento de aleación principal, pero el acero también puede contener otros elementos. En la actualidad, la variedad de los aceros no sólo la define su composición química, sino también un amplio espectro de micro-estructuras incluyendo a escala nano y sub-nano que le otorgan una impresionante variedad de propiedades (World Steel Association, 2008a).

El acero constituye uno de los materiales base de la sociedad moderna. Comenzó a utilizarse hace cerca de 4000 años en Egipto y continúa siendo sustantivo para la civilización actual, por la disponibilidad del hierro, su resistencia y su bajo costo de producción. A pesar del amplio desarrollo de materiales como polímeros, cerámicos y otros compuestos derivados del petróleo o sintéticos, los diferentes tipos de aceros siguen representando la familia de materiales más importante. Son materia prima fundamental para turbinas, transporte, barcos, componentes estructurales de edificios, sistemas de tuberías, motores, válvulas, engranajes, etc. Finalmente, al término de su vida útil el acero puede ser reciclado en forma de chatarra para ser nuevamente utilizado como materia prima.

No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro. Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto, datan aproximadamente del año 3.000 a.C., y se sabe que, inclusive antes de esa época, se empleaban adornos de hierro. Hacia el 1000 a.C., los griegos ya manejaban la fundición, para la fabricación de armas. La fabricación de lo que propiamente se denomina acero,

comenzó años después, debido a que tiene un punto de fusión muy alto (1,500 °C) lo que impide la utilización de hornos convencionales.

De acuerdo con Ortiz (2008), el primer período de la siderurgia se remonta a 1400 años a.C. y se caracterizó porque la fabricación se hacía por reducción directa del mineral de hierro, del cual se obtenían pequeñas partículas metálicas de aspecto esponjoso que luego se martillaban en caliente. Es a lo que en la actualidad se le llama hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

Desde mediados del siglo XIX se han realizado grandes innovaciones y modificaciones a los procesos y equipos empleados, entre los que se pueden mencionar los altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente, el hogar abierto, el proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire, lo cual se debe al inventor británico Henry Bessemer y desde la década de los 60's funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de material de chatarra.

De acuerdo con Spoerl, en 1856, Henry Bessemer introdujo un nuevo método de producción de acero utilizando un horno especial llamado Convertidor. El Convertidor de Bessemer pudo producir cantidades mayores de acero refinado. El sistema consiste en insuflar aire en el fondo del horno para que burbujeara a través del hierro fundido. Este proceso hace que el carbono del hierro genere mucho más calor refinando el metal, esto es, que se eliminan las impurezas del hierro.

Sin embargo, uno de los problemas del proceso Bessmer era que no removía el fósforo del hierro. Por esta razón, en un inicio sólo podía utilizarse con hierro que no tuviera fósforo, lo cual era muy caro y difícil de encontrar. En 1876, Sidney Gilchrist Thomas descubrió que agregando un material químico tan sencillo como la cal a los convertidores, convertía el fósforo contenido en el hierro en escoria, la cual flota en la parte alta del convertidor y puede ser removida.

De forma paralela al Convertidor, en 1860 se desarrolló por Kart Wilhelm Siemens el proceso de horno abierto que consiste en agregar carbón para la reducción del hierro, en un horno que alcanza altas temperaturas. Para separar el fósforo se agrega también cal. Este proceso toma más tiempo que el convertidor, pero permite producir acero con las características químicas deseadas.

Durante la primera parte del siglo XX, el hogar abierto fue la principal tecnología de producción del acero, sin embargo su altísimo consumo de energía y sus impactos ambientales, promovieron nuevos cambios tecnológicos. Después de 1960, el hogar abierto fue sustituido por una adecuación al convertidor de Bessmer-Thomas, el convertidor básico de oxígeno y por el arco eléctrico que utiliza como materia prima la chatarra (Spoerl; Craddock, 1995).

1.2 Procesos de producción

En la actualidad pueden encontrarse tres grandes procesos de fabricación del acero. Dos de ellos pertenecen a la ruta integrada, que provee acero desde el mineral de hierro y que son: el alto horno que produce arrabio y el hogar abierto (Blast furnace-Open Heart: BF-OH), y el alto horno con convertidor básico al oxígeno (BF-BOF por sus siglas en inglés). Ambos emplean materias primas tales como mineral de hierro, carbón, caliza y en algunos casos, chatarra de aceros reciclados. El otro proceso es del horno de arco eléctrico (HEA por sus siglas en inglés) que usa principalmente chatarra de aceros reciclados o hierro de reducción directa (HRD) también denominado hierro esponja.

Los tres procesos de producción pueden ser complementadas con avanzados tratamientos metalúrgicos secundarios que crean la composición deseada de los aceros (World Steel Association, 2008a; IEA, 2006).

La etapa siguiente a la fabricación de productos del acero es la colada, que tiene el objeto de solidificar el acero líquido y darle el formato físico deseado. La colada continua es el proceso generalmente usado para la obtención de palanquillas, barras y planchones. Estos productos semi-terminados son a su vez laminados y transformados en productos terminados de acero, tales como vigas, barras o productos planos que, nuevamente pueden, a su vez, ser sometidos posteriormente a otros procesos de acabado, tales como galvanizado, para ser usados en la construcción o enviados a fabricantes que los utilizan para fabricar productos que contienen acero, como por ejemplo los automóviles (World Steel Association, 2008a; EIA, 2006).

El mineral de hierro existe en abundancia; sin embargo, la fabricación de acero basada en aceros reciclados generalmente requiere menos energía y materiales que el uso de hierro extraído del suelo. Sin embargo, los aceros se usan durante décadas antes de ser reciclados. Dado que la demanda de acero aún continúa creciendo, no alcanza el acero reciclado para cubrir la demanda mundial. Por consiguiente, la demanda se abastece con el uso combinado de los métodos de producción a base de BOF y HEA.

Los métodos más utilizados en la actualidad para la fabricación de acero se muestran en la Figura 1.1

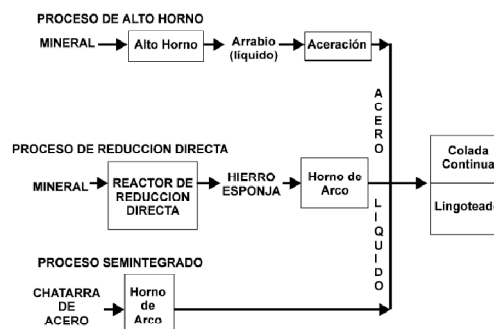


Figura 1. 1. Procesos de producción del acero. Ortíz, 2008.

La Figura 1.2 lo ilustra con más detalle.

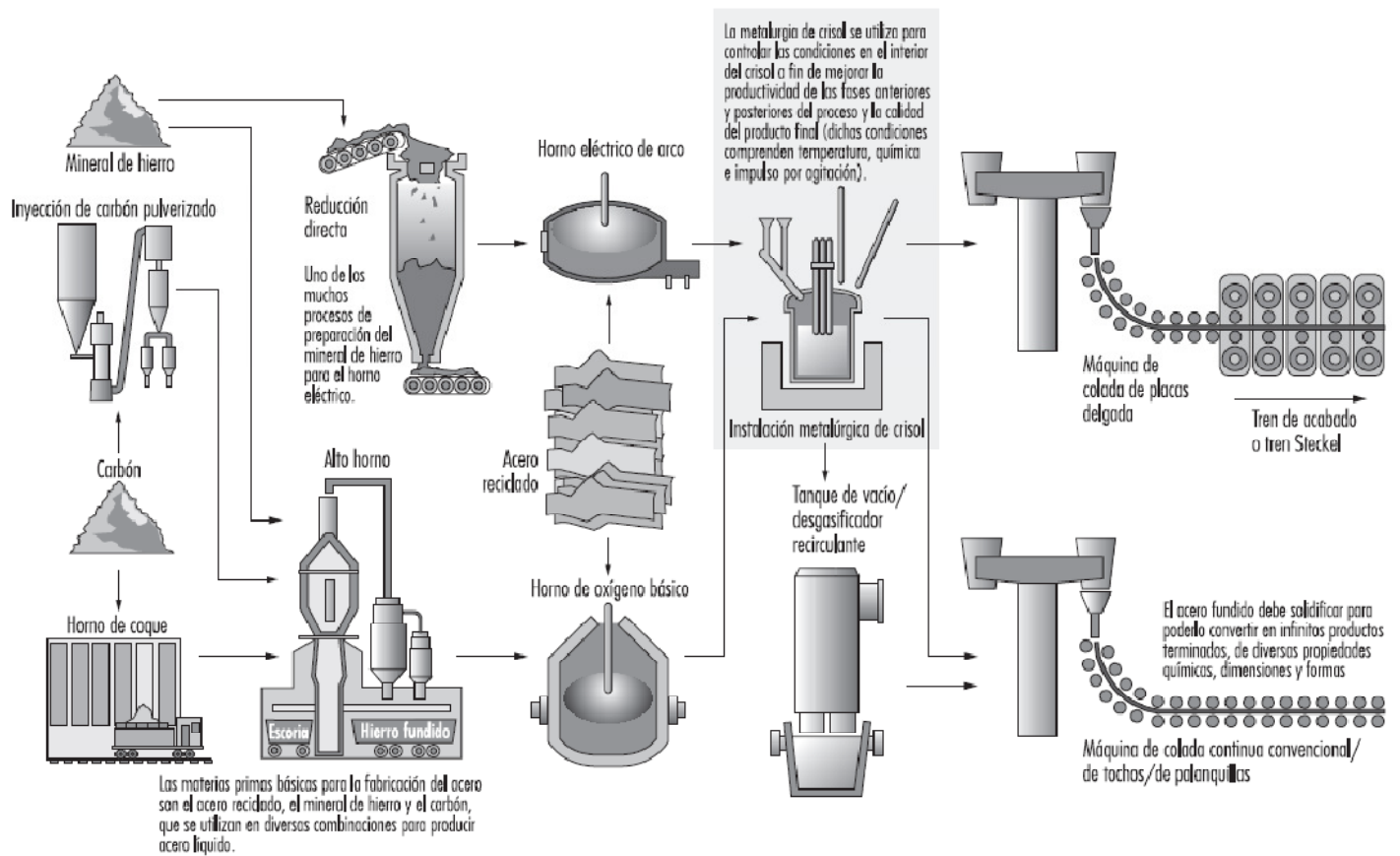


Figura 1. 2. Procesos de producción del hierro y el acero con mayor detalle. American Iron and Steel Institute. Tomado de Masaitis, 2001.

1.2.1 Fabricación de hierro

Las fuentes principales de hierro virgen para la fabricación del acero son el arrabio y el hierro de reducción directa. 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 (Ozawa, 2000). Tradicionalmente, el arrabio es producido en el alto horno, el cual emplea el coque como reductor. Sin embargo hay nuevos procesos que utilizan directamente carbón, lo cual elimina el proceso de transformación de carbón en coque, haciéndolo más eficiente, a este procesos se le denomina de fusión directa o reducción de fisión. Por su parte, el hierro de reducción directa es utilizado como alternativa de alta calidad a la chatarra en el horno de arco eléctrico. Se han desarrollado varios procesos para su fabricación, de acuerdo con el reductor utilizado (Ozawa, 2000).

1.2.1.1 El alto horno para fabricación de hierro

El alto horno es el primer paso en la producción de acero, proveniente de óxidos de hierro. El alto horno apareció en el siglo XIV y en aquel entonces producía una tonelada diaria. Los altos hornos modernos llegan a producir 13 mil toneladas diarias, aun cuando el proceso es esencialmente el mismo (Ricketts, J. en AISI, 2009). La Figura 1.3 muestra las actividades previas que llevan a la producción de hierro en el alto horno.

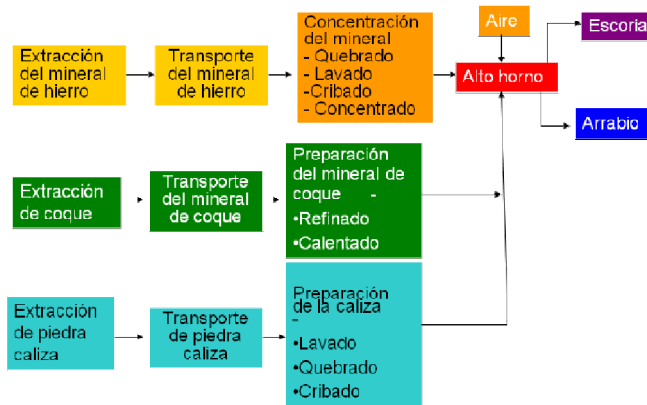
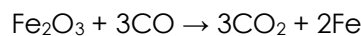


Figura 1. 3. Actividades previas a la producción de hierro en el alto horno. CAP-acero, 2009.

Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son mineral de hierro, coque y caliza. El coque se quema como combustible para calentar el horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. La ecuación de la reacción química fundamental de un alto horno es:



La caliza de la carga del horno se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico. El silicato de calcio y otras impurezas forman una escoria que flota sobre el metal fundido en la parte inferior del horno. El arrabio producido en los altos hornos tiene, en general, la siguiente composición: un 92% de hierro, un 3 o 4% de carbono, entre 0,5 y 3% de silicio, del 0,25% al 2,5% de manganeso, del 0,04 al 2% de fósforo y algunas partículas de azufre.

En el alto horno, el oxígeno es removido del mineral por la acción del CO (monóxido de carbono) gaseoso, el cual se combinó con los átomos de oxígeno en el mineral para terminar como CO₂ gaseoso (dióxido de carbono). Ahora, el oxígeno se empleará para remover el exceso de carbono del arrabio. A alta temperatura, los átomos de carbono (C) disueltos en el hierro fundido se combinan con el oxígeno para producir monóxido de carbono gaseoso y de este modo remover el carbono mediante el proceso de oxidación (CAP-acero, 2009).

Por esta razón, la producción de arrabio genera emisiones de CO₂, en el proceso industrial y no derivadas solamente de la combustión de recursos fósiles.

De forma más detallada las reacciones químicas que se llevan a cabo son las siguientes (Ricketts, J. en AISI, 2009). En el alto horno, el oxígeno de los óxidos de hierro es removido a través de una serie de reacciones químicas que ocurren de la forma siguiente:

- | | |
|--|-------------------|
| 1) $3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = \text{CO}_2 + 2 \text{Fe}_3\text{O}_4$ | Comienza a 455° C |
| 2) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = \text{CO}_2 + 3 \text{FeO}$ | Comienza a 594° C |
| 3) $\text{FeO} + \text{CO} = \text{CO}_2 + \text{Fe}$ | Comienza a 705° C |
| $\text{FeO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Fe}$ | |

Al mismo tiempo que los óxidos de hierro atraviesan por estas reacciones de purificación, comienzan a ablandarse y se convierten en hierro líquido que pasa a través del coque hacia el fondo del horno. El coque desciende hacia abajo del horno, al nivel en el que el aire precalentado entra al alto horno. El coque comienza a arder y reacciona para producir la siguiente reacción



Como la reacción ocurre en presencia de exceso de carbono a alta temperatura, el dióxido de carbono es reducido a monóxido de carbono:

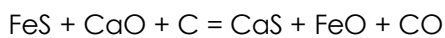


El monóxido de carbono es necesario para reducir el hierro, como se mostró previamente.

Por otro lado, la caliza desciende y reacciona de la siguiente forma:



Esta reacción requiere energía, y comienza alrededor de los 870° C. La caliza (CaO) que se forma, es utilizada para remover el azufre del hierro, como sigue:



El CaS se convierte en parte de la escoria; la cual se forma también por el SiO₂, Al₂O₃, MgO y CaO. La escoria líquida baja hacia el fondo del horno, pero permanece encima del hierro líquido por ser menos densa, lo que permite removerla.

Los gases calientes y tóxicos que se generan durante el proceso son capturados en la parte superior y se hacen pasar por un proceso de limpieza para su reutilización.

La Figura 1.4 muestra un esquema del alto horno.

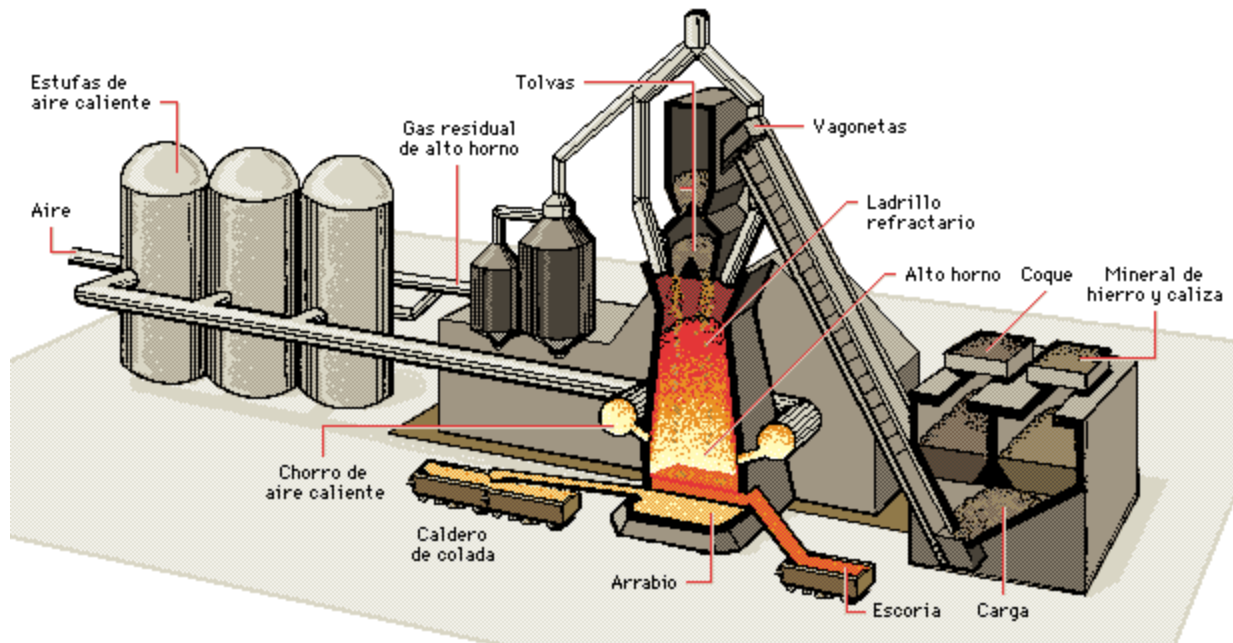


Figura 1. 4. El Alto Horno. Enciclopedia Encarta, 2008

El horno se carga por la parte superior con mineral de hierro, coque y caliza; por la solera se inyecta aire caliente, a menudo enriquecido con oxígeno; y el monóxido de carbono producido a partir del coque transforma el mineral de hierro en un arrabio con carbono. La caliza actúa como fundente. A la temperatura de 1.600 °C el arrabio se funde y se acumula en la solera, y la caliza se combina con la tierra formando escoria. El horno se sangra (es decir, se retira el arrabio) periódicamente, y entonces el arrabio puede moldearse en forma de lingotes para su uso posterior (p. ej., en fundiciones), o se recoge en crisoles en los que se traslada, todavía fundido, a la acería (Masaitis, 2001).

Algunas grandes plantas disponen de hornos de coque en la misma instalación. Generalmente, los minerales de hierro se someten a procesos especiales de preparación antes de ser cargados en el alto horno (lavado, reducción a un tamaño óptimo por triturado y cribado, separación del mineral menudo para sinterizarlo y granularlo, clasificación mecánica para separar la ganga, calcinado, sinterizado y granulado). La escoria retirada del horno puede transformarse en la planta para otros usos, en especial para fabricar cemento (Masaitis, 2001).

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el hierro se sangra cinco veces al día.

El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una temperatura situada entre los 550 y los 900 °C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros que contienen estructuras de ladrillo refractario. El ladrillo se calienta durante varias horas quemando gas de alto horno, posteriormente los gases de escape salen de la parte superior del horno. Después se apaga la llama y se hace pasar el aire a presión por la estufa. El peso del aire empleado en un alto horno supera el peso total de las demás materias primas.

Las cuatro fases principales que se presentan en un alto horno para la obtención del arrabio son (Ortíz, 2008):

1. Combustión del coque y de otros combustibles, tales como hidrocarburos líquidos y gaseosos con la finalidad de conseguir las condiciones necesarias para la reducción.
2. Reducción de los óxidos presentes.
3. Carburación del hierro y fusión del arrabio.
4. Separación del arrabio y escorias por diferencia de densidad.

En la figura 1.5 se muestran las zonas del alto horno y lo que sucede en cada una de ellas.

Los altos hornos modernos funcionan en combinación con hornos básicos de oxígeno, y a veces con hornos de crisol abierto, más antiguos, como parte de una única planta siderúrgica. En esas plantas, los hornos siderúrgicos se cargan con arrabio. El metal fundido procedente de diversos altos hornos puede mezclarse en una gran cuchara antes de convertirlo en acero con el fin de minimizar el efecto de posibles irregularidades de alguno de los hornos.

El arrabio contiene grandes cantidades de carbono y otras impurezas (principalmente azufre y fósforo). Por consiguiente, debe ser refinado. Es preciso reducir el contenido de carbono, oxidar y eliminar las impurezas y convertir el hierro en un metal de alta elasticidad que pueda ser forjado y trabajado. Este es el objeto de las operaciones de fabricación de acero.

1.2.1.2 Fabricación de hierro de reducción directa (HRD)

El HRD es una alternativa de alta calidad para la fabricación de hierro donde se utiliza en el arco eléctrico y se produce principalmente en los países en desarrollo debido a la falta de comercialización de la chatarra. Existen varias tecnologías para la reducción directa del mineral de hierro, dependiendo del mineral introducido: trozos y pelets, o finos de mineral de hierro y del reductor que puede ser gas natural o carbón (Ozawa, 2000).

Los procesos basados en trozos y pelets y en gas como reductor, 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 cuales circulan en contracorriente al hierro introducido en la parte superior del reactor. La temperatura aproximada del proceso es de 900°C. Posteriormente pasa a un proceso de enfriamiento. El producto es comercializado como hierro esponja o como hierro briquetado en caliente (HBC).

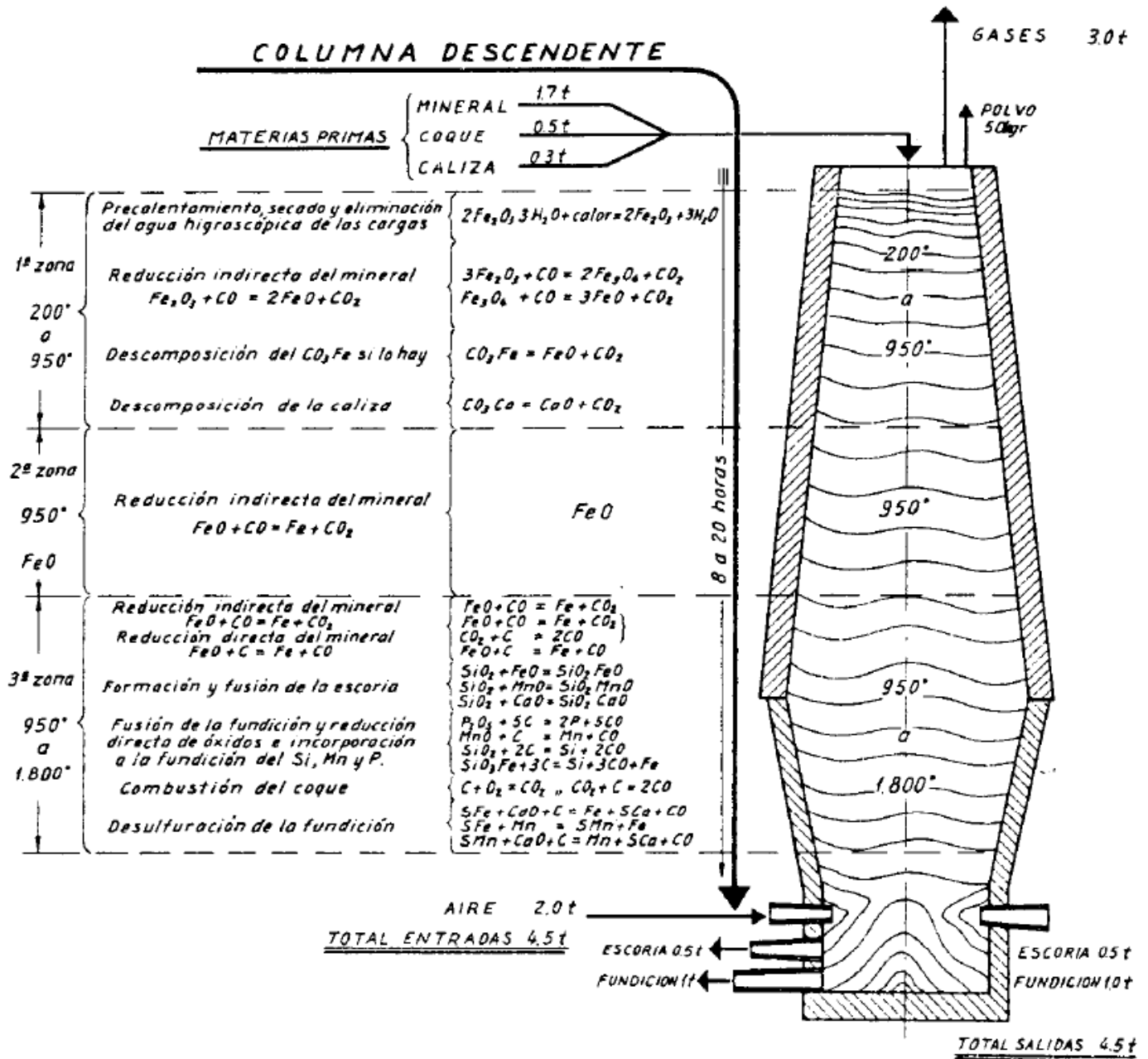


Figura 1. 5. Zonas del Alto Horno. Ortíz, 2008.

Los procesos basados en finos de mineral de hierro y la reducción de gas, emplean lechos fluidizados, entre ellos el Finmet y el carburo de hierro (iron carbide). En estos, 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 (Ozawa, 2000).

Los procesos basados en trozos y pellets y carbón como reductor, emplean hornos rotatorios, donde se reduce el mineral. Entre los procesos que utilizan finos de mineral de hierro y carbón como reductor, se encuentran el Inmetco, el Fastmet y el Circofer, los cuales utilizan hornos anulares.

1.2.2 Fabricación de acero

Existen tres tipos de hornos para la fabricación de acero: el horno de hogar abierto, el convertidor y el horno eléctrico de arco. La mayoría de los hornos de hogar abierto han sido sustituidos por convertidores (que fabrican acero inyectando aire u oxígeno en el hierro fundido) y hornos eléctricos de arco (que fabrican acero a partir de chatarra de hierro y gránulos de fierro esponja) (Masaitis, 2001).

1.2.2.1 Hogar abierto

El horno de hogar abierto semeja un horno enorme, y se le denomina de esta manera porque contiene en el hogar (fondo) una especie de piscina larga y poco profunda (6m de ancho, por 15 m de largo, por 1 m de profundidad, aproximadamente). El horno se carga entre un 30 a un 40% con chatarra y piedra caliza, y el resto con arrabio. Emplea aire pre-calentado, combustible líquido y gas para la combustión. Las llamas de la combustión pasan directamente sobre los materiales, fundiéndolos. Al mismo tiempo, se quema (o se oxida) el exceso de carbono y otras impurezas como el fósforo, silicio y manganeso. Este proceso es intensivo en el uso de combustibles (CAP-acero, 2009).

1.2.2.2 El horno básico de oxígeno (BOF)

La materia prima principal del BOF es 70-80% arrabio que proviene del alto horno y el resto es chatarra. La materia prima se carga en el horno y el oxígeno casi puro (>99.5%) se incorpora al horno a velocidades supersónicas. Esto oxida el carbono y el silicio contenido en el arrabio, liberando grandes cantidades de calor que derrite la chatarra. El producto del BOF es acero líquido con ciertas características químicas. De este proceso puede dirigirse a un proceso mayor de refinación o directamente a la colada. La palabra básica, proviene de la característica del óxido de magnesio, para eliminar el fósforo y el azufre (Stubbles en AISI, 2009). La Figura 1.6 muestra el esquema básico del BOF.

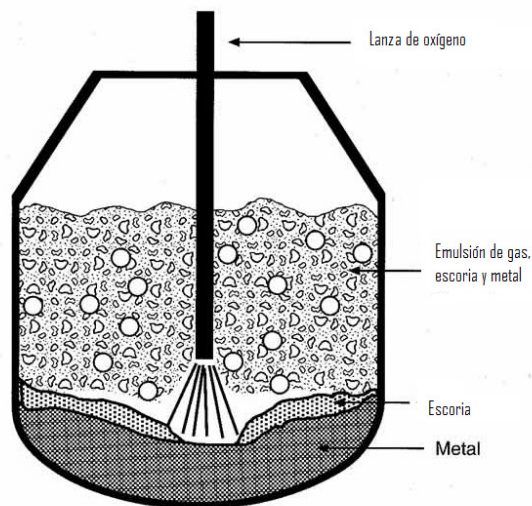


Figura 1. 6. Esquema Básico del BOF. Stubbles en AISI, 2009. Traducción propia.

Un horno básico de oxígeno puede tener el tamaño de un edificio de seis pisos (Figura 1.7). Como este proceso incrementa la productividad en casi un orden de magnitud, en general se requieren dos BOF para sustituir una docena de hornos abiertos o crisoles (Stubbles, 2009).

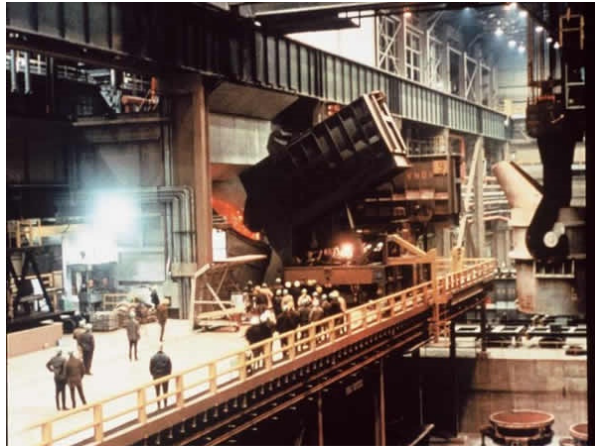


Figura 1. 7. BOF. American Iron and Steel Institute, 2008

En general, el sistema está automatizado. Por ejemplo, al conocer la temperatura del metal caliente y el análisis químico de la mezcla, programas computarizados determinan la proporción óptima de chatarra y de arrabio, adiciones de flujo, tiempo, potencia y tiempo del lanzador de oxígeno.

El proceso comienza cuando la vasija del BOF se inclina cerca de 45 grados hacia el pasillo de carga y la carga de chatarra pasa de una caja de carga hacia la boca del BOF cilíndrico. El arrabio se vierte inmediata y directamente hacia la chatarra desde una cuchara de transferencia. Hojuelas de grafito del carbono saturado del arrabio son emitidas por la boca de la vasija y colectadas por el sistema de control anticontaminante. La carga toma lugar en un par de minutos. Entonces la vasija rota a su posición vertical. Tan pronto como el chorro de oxígeno que entra por la parte superior comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximada de $1,650^{\circ}\text{C}$. El oxígeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria. La lanza se enfría con serpentines interiores de agua, para evitar que se funda (Stubbles en AISI, 2009).

1.2.2.3 Horno de Arco eléctrico

Es probablemente, el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. No solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta $1,930^{\circ}\text{C}$, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión. Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas. El resultado es un acero más limpio. Consecuentemente, puede producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación y aceros especiales para los cuales se emplea principalmente (Figura 1.8).

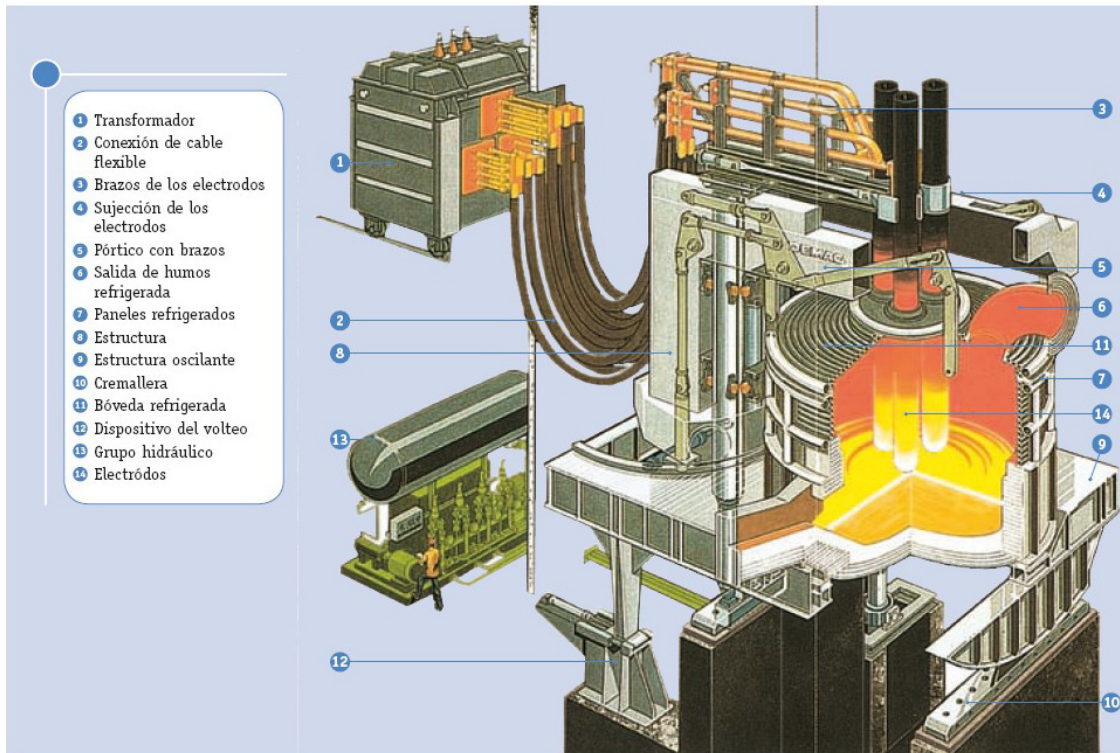


Figura 1. 8. Arco eléctrico. American Iron and Steel Institute, 2008.

El horno de arco eléctrico es utilizado con dos tipos de materia prima. Hierro de reducción directa (HRD) y chatarra. Si se emplea el HRD, éste representa cerca del 80% y 20% de chatarra. Si se emplea chatarra, ésta alcanza el 95% de la materia prima y el resto de fundentes y materiales de aleación (Ozawa, 2000).

En este horno, el material es fundido por el calor generado al producir un arco eléctrico entre los electrodos de carbono y el metal. El voltaje es cercano a los 600 V y la temperatura que alcanza llega a los 4000 °C en unos cuantos segundos (Ozawa, 2000).

La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente. Para acelerar la remoción del carbono, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de un tubo o lanza. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes. Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada (CAP-acero, 2009).

Este horno puede producir una hornada de acero en un período de dos a seis horas, dependiendo del horno individual, su eficiencia energética mejora notablemente al maximizar la cantidad de acero derretido y minimizar las pérdidas de calor. Una imagen de un horno de arco eléctrico se presenta en la Figura 1.9.



Figura 1. 9. HEA. University of Cambridge, teaching and learning packages, 2009.

1.2.3 Refinación secundaria

Tiene como función ajustar la composición del acero líquido a través de la adición de ferroaleaciones para darle las propiedades físicas, químicas y mecánicas que requiere el material antes de la etapa de colado.

1.2.4 Colada

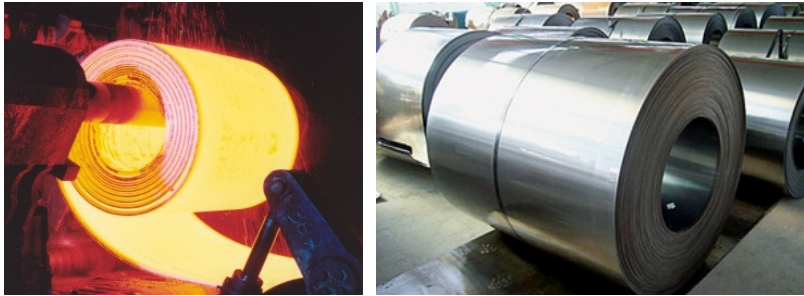
A través del colado, el acero líquido es transformado en productos semi-acabados. La mayor parte del acero líquido es colado continuamente, lo que permite utilizar la energía y el material de manera más eficiente. La colada continua es un procedimiento con el que se producen barras que avanzan y se solidifican a medida que se va vertiendo el metal líquido en una lingotera sin fondo, que se alimenta indefinidamente. Con este proceso se pueden formar, directamente del acero líquido, secciones semi-acabadas sin tener que pasar por la fase de lingote y las etapas de recalentamiento y de laminación de desbaste.

1.2.4.1 Por lingotes

El acero líquido se vacía en moldes denominados lingoteras. Los lingotes deben recalentarse para el proceso de acabado del acero. De los lingotes se obtienen tubos sin costura después de un proceso de laminación en caliente y en frío. También puede pasarse a un proceso de molino debastador para convertir en planchones o en tochos.

1.2.5 Laminación

A través de este proceso se obtienen productos del acero, el cual puede ser en frío o en caliente (Figura 1.10). El laminado en caliente transforma 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 alambón. Se le llama laminación en caliente porque previo a esta etapa los planchones y tochos son enfriados y examinados para remover imperfecciones y posteriormente se recalientan a altas temperaturas para introducirlos en rodillos eléctricos. Los rollos de los productos planos son enviados al laminado en frío para su posterior comercialización (Ozawa, 2000).



Bobina laminada en caliente

Posterior al laminado en frío

Figura 1. 10. Laminado en caliente y en frío. Magnum Global Steel Solutions, 2009.

El proceso de laminación en frío aprovecha la ductilidad del acero para reducir el espesor de las bandas laminadas en caliente, haciéndolas pasar entre dos cilindros cuya separación es inferior al espesor de éstas.

1.2.6 Acabado

Debido a la facilidad que tienen el hierro y el acero para oxidarse cuando entran en contacto con la atmósfera o con el agua, es necesario y conveniente proteger la superficie de sus componentes para protegerlos de la oxidación y la corrosión. Muchos tratamientos superficiales están muy relacionados con aspectos embellecedores y decorativos de los metales.

Los tratamientos superficiales más usados son los siguientes:

- **Cincado:** tratamiento superficial antioxidante por proceso electrolítico o mecánico al que se somete a diferentes componentes metálicos.
- **Cromado:** recubrimiento superficial para proteger de la oxidación y embellecer.
- **Galvanizado:** tratamiento superficial que se da a la chapa de acero.
- **Niquelado:** baño de níquel con el que se protege un metal de la oxidación.
- **Pavonado:** tratamiento superficial que se da a piezas pequeñas de acero, como la tornillería.
- **Pintura:** usado especialmente en estructuras, automóviles, barcos, etc. (Nery, 2007).

1.3 La industria siderúrgica en el mundo

Por la importancia del acero como material, la industria siderúrgica mundial tiene un gran impacto en la economía de las naciones. Asimismo, la economía y sus cambios impactan la producción de acero. De acuerdo con la Asociación Mundial del Acero, la producción mundial tuvo un crecimiento acelerado entre mediados de los años noventa y el 2007, producto principalmente del aumento en el consumo de diversos países asiáticos, principalmente China. En el año 2008, los impactos de la crisis mundial afectaron la producción de acero, disminuyendo ligeramente la producción mundial (Figura 1.11).

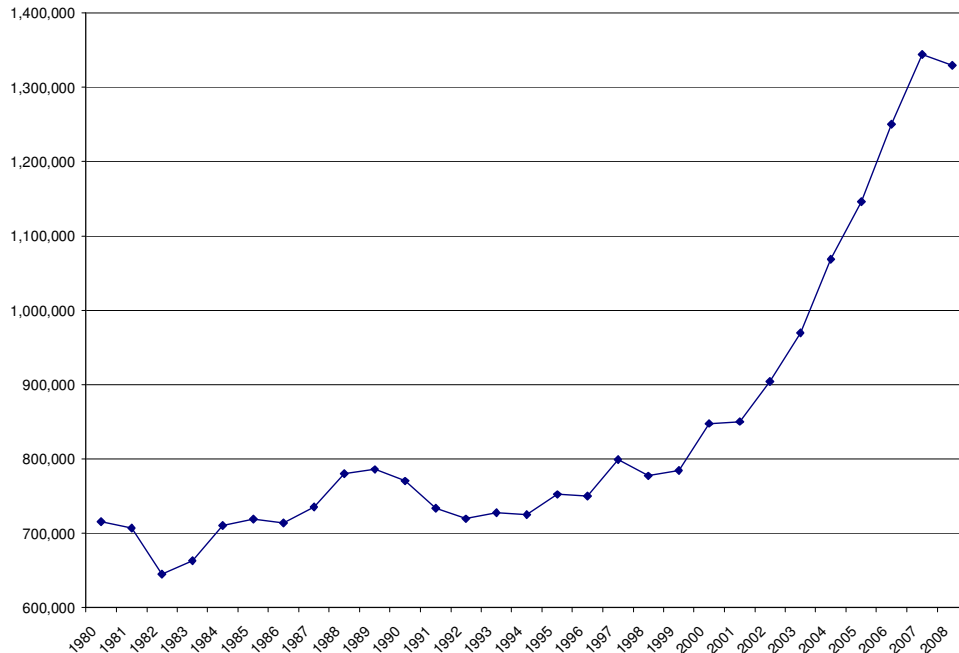


Figura 1. 11. Producción mundial de acero crudo. Elaboración propia a partir de datos estadísticos de la World Steel Association.

En el año 2007, la producción global de acero crudo llegó a 1.3 miles de millones de toneladas. La Tabla 1.1 muestra la producción de acero por país para ese mismo año.

Tabla 1. 1. Los principales países/regiones de mayor producción de acero (2007). World steel in figures, 2008.

		Millones de Toneladas
1	China	489.2
2	Unión Europea (27 países)	209.5
3	Japón	120.2
4	Estados Unidos	98.2
5	Rusia	72.4
6	India	53.1
7	Corea del Sur	51.6
8	Ucrania	42.8
9	Brasil	33.8
10	Turquía	25.8
..15	México	17.6

En 2007 China, la Unión Europea, Japón, los Estados Unidos y Rusia fueron responsables de un 74% del total de la producción, pero China usó aproximadamente 408 millones de toneladas de acero, es decir, un 34% del consumo mundial de acero. A pesar de la situación económica mundial, se espera que el uso de acero en China siga creciendo por lo menos al doble del incremento del resto del mundo (ISII, 2008).

En 2007 se utilizaron los métodos BOF y HEA para producir 66.3% y 31.2%, respectivamente, de los aceros producidos a nivel mundial. La producción por hogar abierto ya sólo representa el 2.5% del acero mundial, debido a sus desventajas ambientales y económicas (World Steel Association, 2008b). La Tabla 1.2 muestra la producción por proceso por región.

Tabla 1. 2. Producción mundial de acero por proceso en 2007. World steel in figures, 2008.

	Producción	BOF	HEA	OH
Unión Europea (27)	209.5	56.9%	40.2%	0.3%
Otros países	29.8	26.4%	73.6%	
CIS*	124.7	54.5%	20.0%	25.5%
Norte América	131.3	41.2%	58.5%	
Canadá	15.6	59.2%	40.6%	
EEUU	98.2	41.1%	55.9%	
México	17.5	26.0%	74.0%	
Centro y Sur	49.3	61.3%	38.7%	
África	18.7	36.5%	63.5%	
Medio Este	16.1	14.1%	85.9%	
Asia	754.1	78.1%	21.7%	
Australia	7.9	80.8%	19.2%	
Nueva Zelanda	0.8	72.5%	27.5%	
Total	1342.2	66.3%	31.2%	0.3%

* Commonwealth of Independent States. Incluye Rusia, Ucrania y otros países de la exURSS

El concepto histórico de economía global ha cambiado para todos los sectores económicos y especialmente para la industria siderúrgica, desde los primeros años de este nuevo siglo XXI. A los factores que la determinaban con anterioridad se han añadido unos nuevos que la hacen más compleja y que permiten calificarla de una nueva economía global multipolar y multidireccional.

La multipolaridad viene determinada por la aparición de economías emergentes, con una gran capacidad de crecimiento, entre las que destaca China pero a la que siguen y seguirán India, Brasil y otros países con menos habitantes pero grandes productores siderúrgicos como México, Polonia o Corea del Sur. Estos nuevos actores están generando ya más del 50% del PIB mundial; y su producción y consumo siderúrgicos están experimentando crecimientos anuales nunca vistos en el sector, mientras las cifras de los países llamados industrializados presentan unos raquíticos crecimientos anuales (Déniz, 2007).

Simultáneamente, la evolución de las comunicaciones y de los intercambios de toda clase de ideas, bienes y servicios, fomentada por los propios Gobiernos e instituciones, está generando a su vez una mayor interdependencia económica, una dispersión geográfica de actividades y un aumento del comercio internacional, así como una aproximación a los mercados y, sobre todo, los consumidores.

Estas circunstancias hacen que en la industria siderúrgica mundial ya no cuenten sólo como actores los países históricamente industrializados y que los flujos de productos siderúrgicos, antiguamente con origen en esos países y destino a los mercados

emergentes, coexistan ahora con crecientes intercambios procedentes de esos nuevos ofertantes y de ellos entre sí, de manera que han pasado de importadores netos siderúrgicos a exportadores presentes ya en todos los principales mercados consumidores del mundo.

Estos cambios, al coincidir con la demanda añadida generada por el propio crecimiento de estos países, ha proporcionado al sector siderúrgico en su conjunto, aunque siempre habrá diferencias por productos, una demanda total creciente y de precios al alza, de los que se están beneficiando todos los fabricantes en esta primera década del nuevo siglo.

La industria siderúrgica mundial ha sabido atender esta demanda global añadida satisfactoriamente, sin provocar escaseces o estrangulamientos en el mercado, aumentando la producción de acero con más capacidad instalada en los países emergentes o mejorando la utilización y la productividad en las industrias tradicionales. Las empresas están haciendo beneficios y esa es la mejor garantía para enfrentar los retos de la nueva situación y hacer de ellos una oportunidad de crecimiento y rentabilidad (Déniz, 2007).

El acero es una industria global. El 35 – 40% del acero del mundo se vende en un país diferente al que se produjo.

El acero es esencial para el crecimiento económico. Recientemente se ha registrado un acentuado incremento de la demanda de acero impulsada por los países en desarrollo. La industria siderúrgica deberá seguir creciendo en un 3% a 5% a nivel mundial y entre un 8 y un 10% en China, India y Rusia para satisfacer la demanda proyectada, que se espera que se duplique para el año 2050 (World Steel Institute, 2008).

CAPÍTULO 2.

LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO

En el presente capítulo se hace un recuento histórico de la industria siderúrgica en México, el cual incluye su desarrollo, propiedad, importancia económica, producción y sus cambios tecnológicos. Estos elementos están sumamente vinculados, por ejemplo la privatización de la industria generó cambios tecnológicos significativos que influyeron en el consumo de energía y las emisiones.

2.1 Historia

La industria siderúrgica mexicana inicia su desarrollo en 1903 con el funcionamiento del primer alto horno de la Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, S.A. (FUMOSA). Posterior a ello, durante las décadas de los 30 y 40's, la industria siderúrgica nacional crece de manera importante, con un apoyo sustantivo del Estado.

La necesidad de acero para los Estados Unidos producto de la segunda guerra mundial y las presiones del propio desarrollo nacional, fomentaron la ampliación de FUMOSA, con la construcción de un segundo horno y la creación de nuevas empresas como Altos Hornos de México, S.A. (AHMSA) en 1942, con capital gubernamental y privado. AHMSA empezó a operar con equipos de segunda mano adquiridos por acerías estadounidenses, mediante facilidades del Consejo de Producción de Guerra comprometiéndose a proveer placa de acero a los Estados Unidos para la construcción de barcos de guerra. En 1943, la iniciativa privada incrementó su participación en el sector siderúrgico con la creación de Hojalata y Lámina, S.A. (HYLSA) en Monterrey, N.L., la cual inició con un taller de laminación integrado por 16 personas con capital de 3 millones de pesos y con equipo de segunda mano comprado en Estado Unidos. En 1953, AHMSA sobrepasó la producción de Fundidora, diversificando sus productos con la adquisición de un molino rodado en frío para la producción de hojalata (Simón, 1997; Rueda, 1994).

El crecimiento económico de la época, sustentado en el modelo de sustitución de importaciones y el apoyo a la industria nacional, generó un gran dinamismo en la industria de la construcción, la minería y muchas otras, lo cual aumentó el consumo aparente de acero. El sector siderúrgico se benefició del apoyo y de subsidios estatales para impulsar la industrialización, tales como protección arancelaria, exenciones o reducción de impuestos, facilidades de crédito, subsidios en el precio de los energéticos, transportes ferroviarios, etc.

En 1955 se crea Tubos de acero de México, S.A. (TAMSA) en la ciudad de Veracruz, la cual se dedicaría a la producción de tubos para el mercado interno y externo; esta empresa inicia de forma semi-integrada y en 1959, se integra con la producción de su propio

acero. Por su parte, en 1960 HYLSA se convierte en empresa integrada con una producción de 750 toneladas por día, generando su propio proceso de producción denominado HYL (Simón, 1997; Rueda, 1994).

En 1972, se realizó la primera etapa de la Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas, S.A. (SICARTSA) en el estado de Michoacán. La creación de las Truchas implicó la generación de un polo de desarrollo regional a través de una infraestructura urbano-industrial.

En 1978, se formó el grupo SIDERMEX con las empresas acereras paraestatales con objeto de incrementar la producción nacional de acero, así como la productividad de las industrias existentes (Rueda y Simón, 2001)

Mientras esto ocurría en México, a nivel internacional se registraba una crisis de la industria siderúrgica iniciada a principios de la década de los setentas. Esta crisis fue provocada, entre otros factores, por los altos precios del petróleo, la reducción del crecimiento económico de los países industrializados, la tendencia a la terciarización, el bajo consumo de acero de las ramas de punta, la sustitución del acero por otros materiales (polímeros, metales no ferrosos, cerámicos, etc.), el uso de aceros más livianos y resistentes (Rueda, 2001) y la desaceleración de la demanda de bienes de capital pesado y la competencia de los países de reciente industrialización (Guzmán, 2002).

Por su parte, Solari y Martínez (2004), proponen otros factores que también influyeron en esta crisis, tales como la importancia de la industria siderúrgica en el eslabón de la industrialización, la alta concentración o monopolización de las industrias siderúrgicas en el mundo, bajas tasas de productividad, la fortaleza de los sindicatos que generaron movimientos para evitar la disminución de sus condiciones laborales y los costos ambientales.

Para dar idea de la crisis internacional de la industria siderúrgica baste mencionar que en 1975 la demanda de acero había disminuido alrededor de un 30 por ciento, y los precios hasta en 50 por ciento. El crecimiento promedio anual de la producción mundial de acero que había sido de 6.1% entre 1963 y 1973, pasó al 2% en las décadas siguientes. El crecimiento más bajo se verificó durante el período de 1979 a 1985, en menos 0.5 por ciento (Rueda, 2001).

En este contexto, se generó una nueva división en la producción de acero mundial. Por un lado, los países industrializados, para reducir los costos de la producción de acero y por razones ambientales, se encargarían de producir los aceros especiales, finos, ligeros e inoxidables, con mayor valor agregado; mientras que América Latina y otros países en desarrollo, se ocuparía de los aceros comunes, asociados a procesos notablemente más contaminantes. Esta división se empalmaba, contribuía y era compatible con el abandono del modelo de sustitución de importaciones que estaba verificándose en América Latina (Solari y Martínez, 2004).

Entre los periodos 1970-74 y 1985-89 la contribución de los países industrializados a la producción mundial de acero se redujo de 65.5 a 50.2%, en tanto que la de las naciones en desarrollo ascendió de 4.1 a 11.9 por ciento. En el caso de América Latina esta tendencia estuvo influida de manera especial por el bajo costo de la fuerza de trabajo y de la energía (Solari, Martínez, 2004).

Desde mediados de los años setenta y para enfrentar la crisis de la rama, los países industrializados incorporaron varios cambios tecnológicos. Se lograron nuevos procesos como el de reducción directa, el convertidor básico de oxígeno, la colada continua, el

uso del control computarizado y el reciclamiento optimizado de la chatarra; además del aumento en la productividad y la disminución de costos, estos procesos permitieron una producción de aceros de mayor calidad, eficiencia, seguridad y con menores impactos ambientales (Solari, Martínez, 2004).

En México, en 1981 como parte de la crisis económica nacional, se presenta una crisis de la industria siderúrgica mexicana, como consecuencia de los desequilibrios macroeconómicos originados por la baja de los precios internacionales del petróleo, el aumento de la deuda externa, las tasas de interés y la restricción de préstamos del exterior. En 1982, el consumo nacional aparente de acero descendió en 27.6% originado en parte por la crisis de la industria manufacturera en la rama de productos metálicos, maquinaria y equipo y de la industria de la construcción.

Las empresas siderúrgicas se ven obligadas a cambiar su estrategia de desarrollo industrial: buscar mercados en el exterior y elevar su productividad y calidad para poder competir ante la sobreoferta mundial de acero y las medidas proteccionistas de los países industrializados. El servicio de la deuda externa fue el objetivo primordial de la política del gobierno de Miguel de la Madrid; se incrementaron las exportaciones y se redujeron las importaciones, se comprimió el mercado interno mediante el descenso de la inversión y gastos públicos y la caída de los salarios reales (Simón, 1997).

Dicha política, enmarcada en el contexto internacional de reducción de la participación del Estado en la economía y con ello el impulso a la privatización de las empresas estatales, produjo un recorte en el presupuesto de las empresas siderúrgicas para-estatales, lo cual aunado a la disminución de la demanda interna agravó sus problemas financieros. El gobierno mexicano asumió los pasivos de las siderúrgicas y apoyó a las privadas para evitar la quiebra. En 1986, se declaró la quiebra de FUMOSA, la cual había sido adquirida por el Estado en 1977.

De esta forma, mientras la industria siderúrgica mexicana, desde principios del siglo XX hasta mediados de los años ochentas estuvo marcada por el sustento y apoyo estatal, a partir de finales de los ochenta, esta rama industrial está marcada por la privatización y la apertura comercial consolidada en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLC). De estos dos acontecimientos nacen los principales desafíos de la industria siderúrgica nacional a partir de la década de los noventas (Hernández et. al., 2000).

Es en realidad a partir de 1986, que se inicia el redimensionamiento de la industria siderúrgica paraestatal, lo que culmina finalmente con la privatización de las empresas en poder del Estado. Esta situación, también ocurrió en otros países de América Latina. Los procesos de privatización se iniciaron en Brasil y México (1991), luego Argentina (1992), Perú (1996) y Venezuela (1997) y estuvieron acompañados por grandes inversiones, mejoras tecnológicas y mecanismos de apertura al mercado externo (López, 2001).

En noviembre de 1991, AHMSA fue vendida al Grupo Acerero del Norte (GAN). SICARTSA se dividió en dos: SICARTSA y la Siderúrgica de Balsas (SIBALSA), la primera fue vendida al grupo Villacero y la segunda al grupo hindú Caribbean Ispat. La sección de Aceros Planos de FUMOSA fue adjudicada a Industrias Monterrey, GAN, Villacero y Duferco Steel.

En 1992, la industria siderúrgica incrementó su producción en 6.3%. En ese año HYLSA, anunció la construcción de una nueva planta para la producción de planos, se dieron a

conocer proyectos de modernización de AHMSA en Monclova, de HYLSA en Monterrey y Puebla y de SICARTSA, además de que TAMSA tuvo que cerrar su planta No. 1.

Al igual que la industria siderúrgica en todo el mundo, la mexicana generó diversas modificaciones que incluyen profundos cambios en la gestión y organización a nivel de planta, incluyendo el ajuste de personal; modernización de sus equipos; búsqueda de nuevos productos y procesos; sustitución de importaciones e inicio de exportaciones; ajuste en las relaciones laborales; así como una reconsideración del rol que le darán a la gestión del recurso humano en la búsqueda de una mayor productividad y competitividad en la industria (Simón, 1997).

Asimismo, la industria siderúrgica nacional ha ido generando diversas alianzas, fusiones y adquisiciones que han ido redefiniendo el perfil de esta rama. Corrales, 2007; las describe con detalle.

De acuerdo con el INEGI, para 2006 existían 6 industrias siderúrgicas integradas y 63 dedicadas a productos derivados del acero. Por su parte, las empresas integradas a lo largo de las últimas dos décadas han ido cambiando de dueño y se han ido aliando o han sido adquiridas por empresas transnacionales. De acuerdo con información de la Cámara Nacional del Acero, la Figura 2.1 muestra el perfil de la industria en el año 2007.



Figura 2. 1. Distribución geográfica de la industria siderúrgica nacional. CANACERO, 2007.

2.2 Producción e importancia económica de la industria siderúrgica 1970-2006

La industria siderúrgica representó en 2006, el 0.7% del Producto Interno Bruto (PIB) Nacional, el 2.9% del PIB industrial y el 3.8% del PIB manufacturero. Esta proporción es mayor que la que se tenía en 1970, cuando representaba el 0.6%, 2.4% y 3.2% respectivamente (INEGI, 1996). La Figura 2.2 muestra estos cambios para el periodo de estudio. Como puede observarse, entre 1970 y 2006, el PIB de la industria siderúrgica aumentó 4.3 veces. Este crecimiento fue mayor que el del PIB nacional, industrial y manufacturero. De 1970 a 1994 es clara la similitud en el comportamiento del PIB siderúrgico y el PIB nacional, sin embargo, la crisis económica de 1995 no afectó a la industria siderúrgica, debido a que se reorientó la producción hacia las exportaciones, como se muestra en la Figura 2.3. Sin embargo, en 2001 cae la producción de la siderurgia nacional debido, tanto a la contracción económica nacional, como a la limitación en las exportaciones producto de la caída en la demanda de este producto en Estados Unidos,

así como por el bajo nivel del precio del acero proveniente de otras regiones, principalmente China. Asimismo, en 2006, la producción de acero se vio afectada por las importaciones y el incremento de los precios (Figura 2.4).

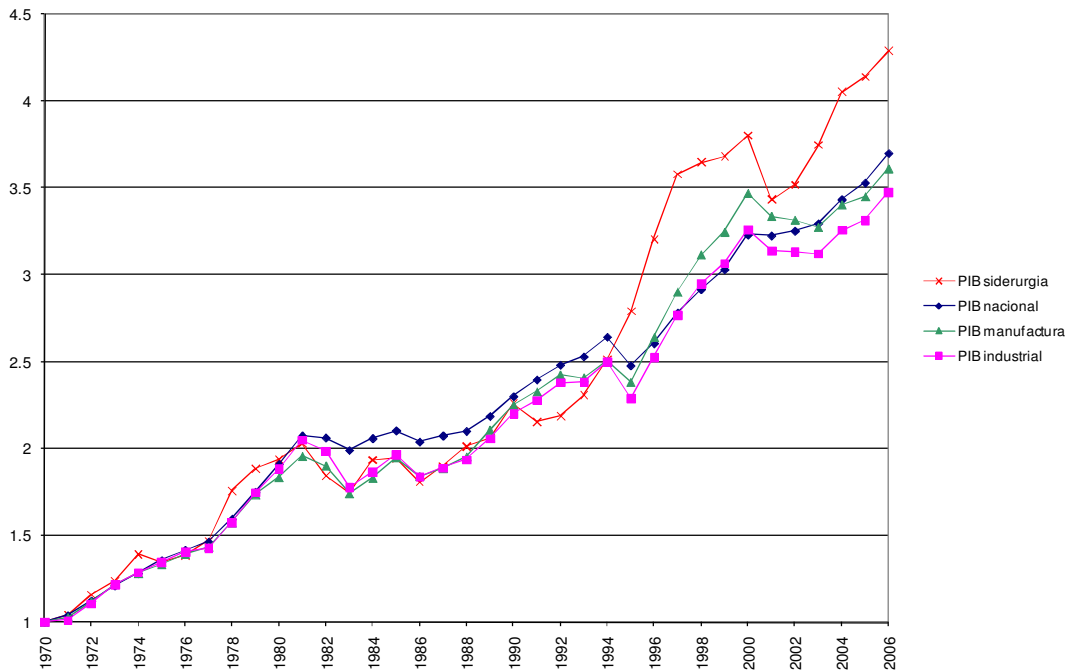


Figura 2. 2. Cambios en el PIB nacional, industrial, manufacturero y de la industria siderúrgica. Elaboración propia con base a datos de INEGI.

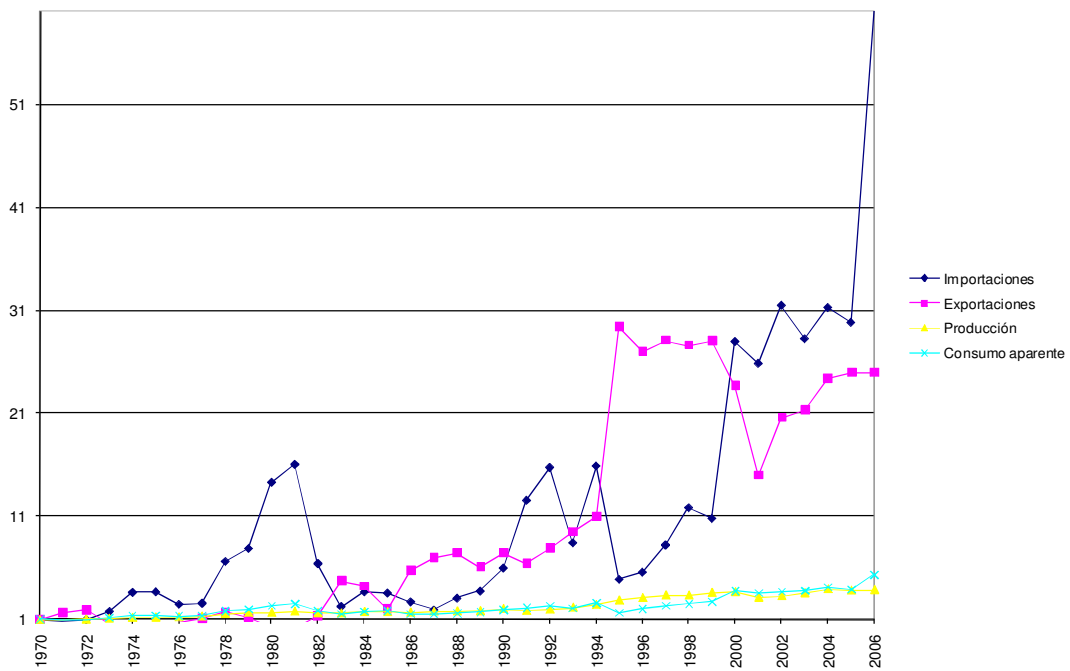


Figura 2. 3. Cambios en la producción, exportación e importaciones. Elaboración propia con base a datos de INEGI para producción de acero, exportaciones e importación de productos

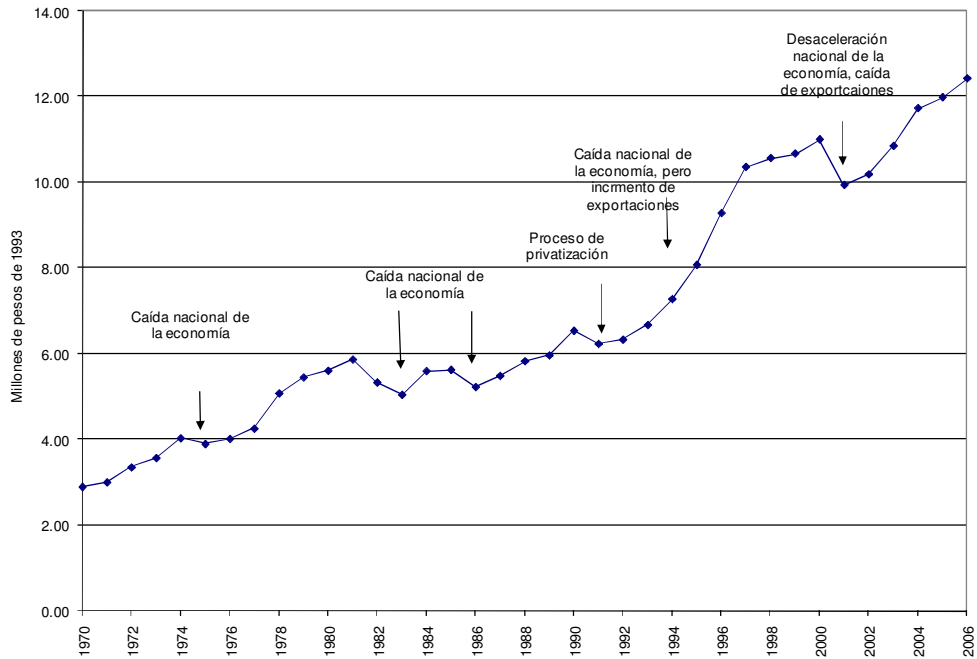


Figura 2. 4. Comportamiento del PIB de la industria siderúrgica nacional. Elaboración propia. Datos de INEGI. Para 2004 a 2006, variación física de la producción.

Al analizar los cambios a través de la producción física (Figura 2.5), puede observarse que la producción de acero alcanzó el valor de 16.447 millones de toneladas, casi cuatro veces más que en 1970, pero ligeramente menor que en 2004. El mayor incremento en la producción se presenta en la década de los noventa, tiene una caída significativa en 2001, crece nuevamente hasta 2004 y cae ligeramente en 2005.

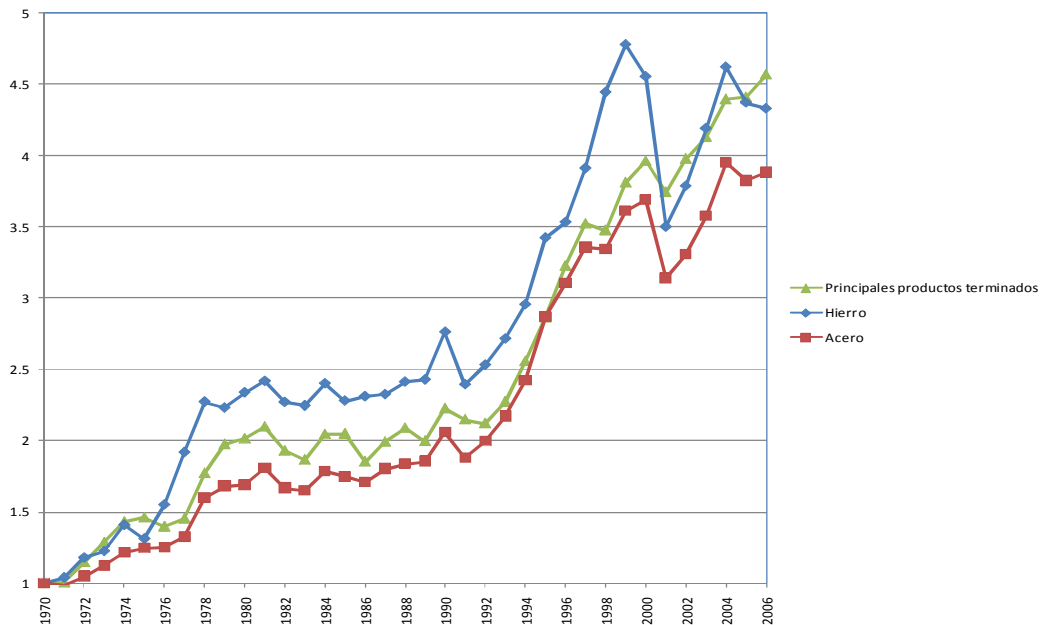


Figura 2. 5. Cambios en la producción física de la industria siderúrgica nacional. Elaboración propia con base en datos de INEGI.

Los mayores cambios tecnológicos en la industria se presentan en la década de los noventa. En producción de hierro, se incrementa la reducción directa (Tabla 2.1). En el

acero, desaparece la producción del hogar abierto en 1992 y se incrementa significativamente el arco eléctrico a través de diversas acerías (Tabla 2.2) y el convertidor al oxígeno, y finalmente, en la producción final aumenta la colada continua. Estos cambios tendrán implicaciones significativas en el consumo de energía, ya que las tecnologías modernas tienen un menor consumo por tonelada producida (Figura 2.6).

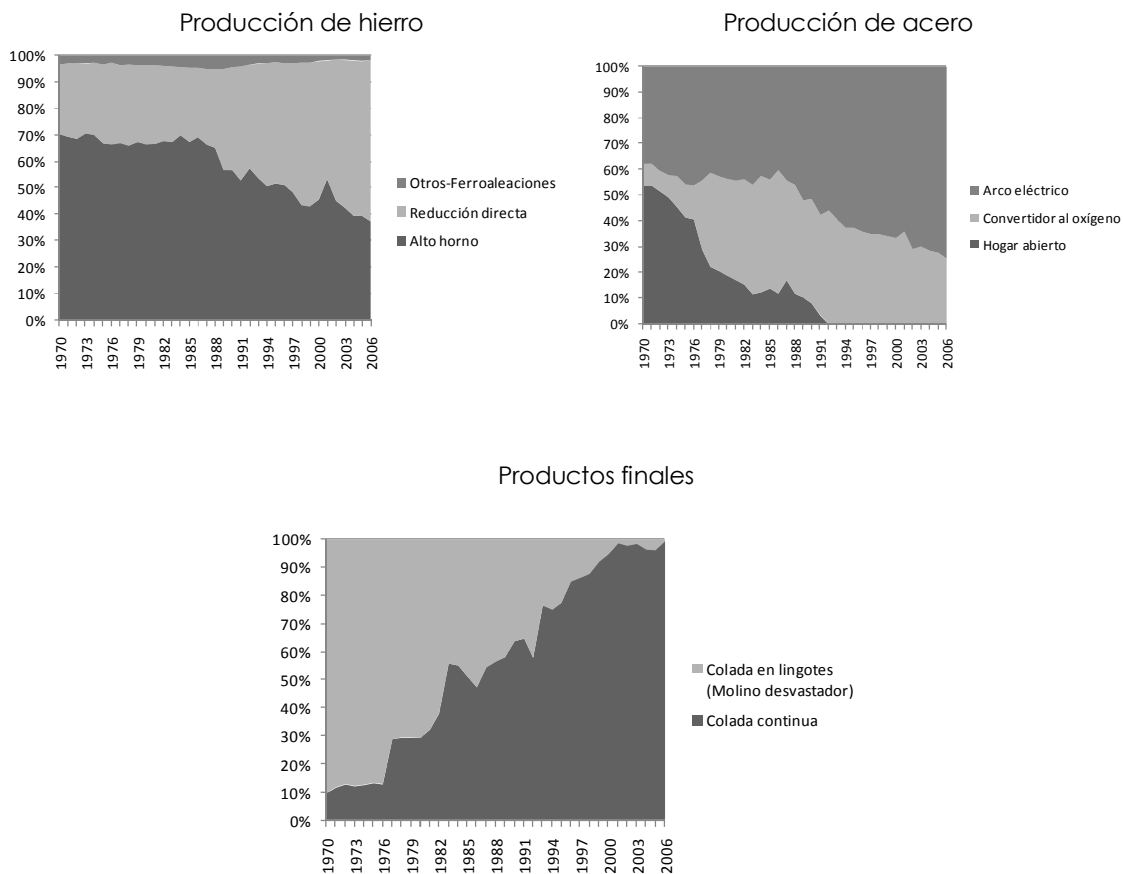


Figura 2. 6. Cambios tecnológicos en la siderúrgica nacional. Elaboración propia con base en datos de INEGI.

Tabla 2. 1. Producción de hierro por tecnología. Información de INEGI, varios años.

	Producción de hierro (millones de toneladas)	Alto horno	Reducción directa	Otros (ferroaleaciones)
1970	2.34	70.4%	26.4%	3.2%
1971	2.42	69.4%	27.8%	2.8%
1972	2.75	68.7%	28.5%	2.8%
1973	2.86	70.8%	26.4%	2.9%
1974	3.29	70.1%	27.5%	2.5%
1975	3.06	66.9%	29.9%	3.2%
1976	3.62	66.6%	30.8%	2.6%
1977	4.48	67.1%	29.5%	3.4%
1978	5.31	66.1%	30.7%	3.2%
1979	5.21	67.5%	28.9%	3.5%
1980	5.46	66.6%	30.0%	3.4%
1981	5.65	66.7%	29.9%	3.5%
1982	5.30	67.9%	28.4%	3.8%
1983	5.24	67.4%	28.5%	4.0%
1984	5.61	70.0%	25.8%	4.2%
1985	5.32	67.5%	28.2%	4.3%
1986	5.40	69.3%	26.3%	4.4%
1987	5.43	66.5%	28.6%	4.9%
1988	5.64	65.3%	29.9%	4.8%
1989	5.67	56.9%	38.1%	4.9%
1990	6.45	56.8%	39.1%	4.1%
1991	5.59	53.0%	43.1%	3.9%
1992	5.91	57.5%	39.2%	3.2%
1993	6.34	54.0%	43.2%	2.9%
1994	6.91	50.7%	46.6%	2.7%
1995	8.00	51.8%	45.9%	2.3%
1996	8.25	51.2%	46.0%	2.8%
1997	9.14	48.7%	48.6%	2.7%
1998	10.38	43.6%	53.8%	2.6%
1999	11.17	43.2%	54.4%	2.5%
2000	10.64	45.6%	52.5%	1.9%
2001	8.18	53.5%	44.9%	1.6%
2002	8.85	45.2%	53.6%	1.3%
2003	9.79	42.7%	55.9%	1.4%
2004	10.80	39.6%	58.8%	1.6%
2005	10.21	39.6%	58.5%	1.9%
2006	10.12	37.5%	61.0%	1.6%

Tabla 2. 2. Producción de acero por tecnología. Información de INEGI, varios años.

	Producción de acero (millones de toneladas)	Hogar abierto	Horno básico de oxígeno	Arco eléctrico
1970	4.23	53.9%	8.3%	37.7%
1971	4.17	53.7%	8.5%	37.8%
1972	4.43	51.5%	8.0%	40.5%
1973	4.76	49.1%	8.8%	42.1%
1974	5.14	45.4%	12.3%	42.3%
1975	5.27	41.4%	13.0%	45.5%
1976	5.30	40.7%	13.3%	46.1%
1977	5.60	29.1%	26.8%	44.1%
1978	6.78	22.2%	36.5%	41.2%
1979	7.12	20.6%	36.6%	42.7%
1980	7.16	18.9%	37.6%	43.6%
1981	7.66	17.2%	38.8%	44.0%
1982	7.06	15.3%	41.2%	43.5%
1983	6.98	11.6%	42.5%	45.9%
1984	7.56	12.3%	45.3%	42.4%
1985	7.40	13.8%	42.4%	43.8%
1986	7.23	11.8%	47.9%	40.2%
1987	7.64	17.1%	38.8%	44.0%
1988	7.78	11.9%	42.2%	45.8%
1989	7.85	10.5%	37.8%	51.8%
1990	8.73	8.2%	40.4%	51.4%
1991	7.96	3.3%	39.2%	57.5%
1992	8.46	0.0%	44.3%	55.7%
1993	9.20	0.0%	40.8%	59.2%
1994	10.26	0.0%	37.4%	62.6%
1995	12.15	0.0%	37.4%	62.6%
1996	13.17	0.0%	35.9%	64.1%
1997	14.22	0.0%	34.9%	65.1%
1998	14.18	0.0%	35.0%	65.0%
1999	15.30	0.0%	34.3%	65.7%
2000	15.63	0.0%	33.5%	66.5%
2001	13.30	0.0%	35.9%	64.1%
2002	14.01	0.0%	29.4%	70.6%
2003	15.16	0.0%	30.3%	69.7%
2004	16.74	0.0%	28.5%	71.5%
2005	16.20	0.0%	27.8%	72.2%
2006	16.45	0.0%	25.5%	74.5%

Tabla 2. 3. Producción de algunos terminados por tecnología. Información de INEGI, varios años.

	Producción (millones de toneladas)	Colada continua	Colada en lingotes
1970	3.88	9.8%	90.2%
1971	3.82	11.8%	88.2%
1972	4.43	12.9%	87.1%
1973	4.76	12.2%	87.8%
1974	5.14	12.6%	87.4%
1975	5.27	13.3%	86.7%
1976	5.30	12.8%	87.2%
1977	5.60	28.9%	71.1%
1978	6.77	29.5%	70.5%
1979	7.12	29.5%	70.5%
1980	7.16	29.3%	70.7%
1981	7.62	32.3%	67.7%
1982	7.00	38.1%	61.9%
1983	6.90	55.8%	44.2%
1984	7.41	55.1%	44.9%
1985	7.38	51.1%	48.9%
1986	7.20	47.4%	52.6%
1987	7.60	54.5%	45.5%
1988	7.69	56.5%	43.5%
1989	7.78	58.1%	41.9%
1990	8.67	63.6%	36.4%
1991	7.95	64.6%	35.4%
1992	9.43	57.7%	42.3%
1993	9.18	76.5%	23.5%
1994	10.25	75.0%	25.0%
1995	12.35	77.4%	22.6%
1996	13.17	85.1%	14.9%
1997	13.93	86.4%	13.6%
1998	13.68	87.8%	12.2%
1999	14.07	92.0%	8.0%
2000	15.63	94.7%	5.3%
2001	13.30	98.6%	1.4%
2002	14.01	97.8%	2.2%
2003	15.16	98.3%	1.7%
2004	16.74	96.2%	3.8%
2005	16.28	96.2%	3.8%
2006	16.45	99.3%	0.7%

CAPÍTULO 3.

CONSUMO DE ENERGÍA DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA, 1970-2006

En este capítulo se analiza al consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana, proporcionando valores por combustible, que muestran la tendencia del consumo de energía para todo el período de estudio. Además, se analiza al consumo específico de energía, definiéndolo y mostrando sus respectivos valores, lo cual permite analizar el aumento en la eficiencia energética durante el periodo de 1970 a 2006.

3.1 Consumo de energía

El desarrollo de un país se encuentra ligado al consumo de energía. Durante el siglo XX, el combustible que mayor crecimiento tuvo fue el petróleo por su versatilidad y amplitud de reservas. La industria siderúrgica, sin embargo, por las características de los procesos químicos y tecnológicos; está sustentada principalmente en el carbón y fundamentalmente en su principal derivado que es el coque, el gas natural (necesario para los procesos de reducción directa y el horno básico de oxígeno) y la electricidad, necesaria en todos los procesos, pero indispensable en el horno de arco eléctrico.

El consumo final se refiere al consumo de energía en los sectores finales, es decir, la energía después de los procesos de transformación. Para la industria siderúrgica nacional, incluye el consumo de derivados del petróleo como diesel, combustóleo y coque de petróleo, carbón y coque de carbón, gas natural y electricidad.

En este trabajo, la energía primaria se contabiliza como la suma de los combustibles más la energía primaria necesaria para la producción de la electricidad que se utiliza en la industria siderúrgica. Es decir el consumo de electricidad de la industria entre su eficiencia de generación (incluye pérdidas por transmisión y distribución).

La producción de electricidad está basada en determinadas fuentes de energía; en este trabajo se considera que la estructura de generación eléctrica nacional es la misma que la que utiliza la industria siderúrgica.

La industria siderúrgica es el sub-sector de mayor importancia en el consumo de energía final industrial en México y en la mayoría de los países donde se produce hierro y acero, debido a que es intensiva en el uso de la energía.

En 2006, el consumo de energía final de la industria siderúrgica alcanzó 241.278 PJ, lo cual representó el 19.2% del consumo final de energía industrial y el 5.8% del consumo final de energía a nivel nacional.

La Tabla 3.1 muestra el consumo de electricidad de la industria siderúrgica nacional, la eficiencia, la energía primaria y los combustibles utilizados para generarla. No se tomaron en cuenta las fuentes renovables (hidráulica, geotérmica, eólica) ni la nuclear, debido a que interesan los combustibles por sus emisiones (esto se explica con mayor detalle en el siguiente capítulo).

Por otro lado, la Figura 3.1 muestra el consumo de energía primaria (considerando las pérdidas por generación, transmisión y distribución de electricidad) de la industria siderúrgica nacional.

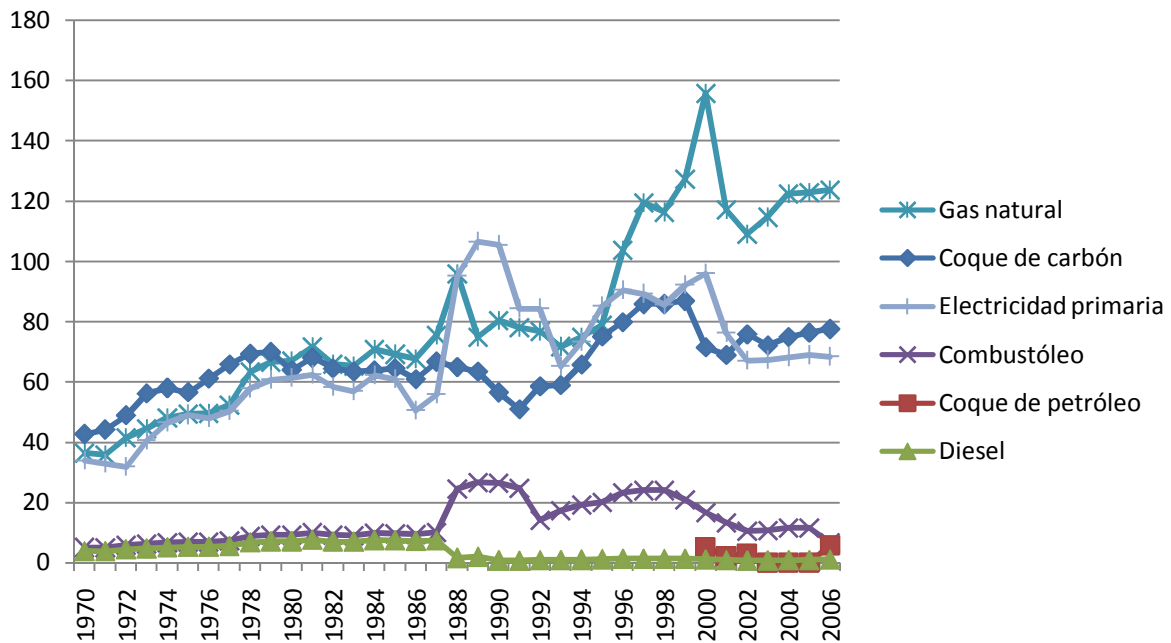


Figura 3. 1. Consumo de energía de la industria siderúrgica nacional. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).
Eficiencia, CFE varios años. Electricidad primaria se refiere al consumo de electricidad incorporando la eficiencia en la generación.

Como puede observarse en la Figura 3.1, el gas natural es el combustible de mayor crecimiento, asociado principalmente al aumento de la reducción directa, seguido por la electricidad asociado al aumento en el uso del arco eléctrico. La Tabla 3.2 muestra el cambio por periodos del consumo de cada energético.

Tabla 3. 1. Consumo de electricidad (final y primaria) de la industria siderúrgica nacional. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).
Eficiencia, CFE varios años.

	Combustible	para	generación	eléctrica
--	-------------	------	------------	-----------

	Consumo final de electricidad PJ	Eficiencia	Consumo primario PJ	Carbón	Diesel	Combustóleo	Gas Natural
1970	7.457	22.0%	33.833	1.5%	6.8%	53.2%	38.6%
1971	7.331	22.4%	32.742	0.9%	4.2%	57.7%	37.2%
1972	8.505	26.8%	31.776	1.1%	5.6%	61.8%	31.6%
1973	9.313	23.0%	40.522	0.9%	7.5%	62.8%	28.8%
1974	10.880	23.4%	46.423	0.8%	10.1%	65.7%	23.3%
1975	11.210	22.9%	48.871	0.6%	15.0%	57.9%	26.5%
1976	11.318	23.6%	47.939	0.6%	13.0%	65.6%	20.7%
1977	12.344	24.6%	50.272	0.6%	9.7%	70.5%	19.1%
1978	14.588	25.2%	57.791	0.0%	10.6%	68.6%	20.8%
1979	15.350	25.3%	60.710	0.0%	10.0%	62.9%	27.1%
1980	15.417	25.2%	61.267	0.0%	8.7%	68.8%	22.5%
1981	15.710	25.2%	62.384	0.0%	8.7%	70.1%	21.2%
1982	15.229	26.1%	58.274	2.1%	5.8%	71.3%	20.7%
1983	15.063	26.5%	56.836	4.0%	2.1%	77.6%	16.3%
1984	16.337	26.3%	62.149	5.0%	2.6%	79.9%	12.5%
1985	16.126	26.5%	60.808	5.8%	1.7%	79.9%	12.7%
1986	13.679	27.1%	50.456	8.4%	1.2%	75.7%	14.6%
1987	15.197	27.2%	55.830	8.8%	1.6%	75.3%	14.3%
1988	26.027	27.4%	95.136	9.3%	0.9%	76.8%	13.0%
1989	29.134	27.4%	106.505	9.0%	1.4%	76.7%	13.0%
1990	29.477	28.0%	105.453	8.5%	1.7%	73.7%	16.1%
1991	23.844	28.3%	84.304	8.4%	1.8%	71.6%	18.2%
1992	23.982	28.4%	84.312	9.0%	1.4%	72.4%	17.3%
1993	18.816	28.9%	65.177	11.1%	1.3%	71.3%	16.4%
1994	20.985	28.6%	73.270	11.5%	1.2%	71.2%	16.1%
1995	25.372	29.8%	85.153	13.6%	1.0%	67.5%	18.0%
1996	26.900	29.7%	90.450	15.6%	0.9%	65.9%	17.6%
1997	27.700	31.1%	89.196	14.1%	1.1%	67.7%	17.1%
1998	27.689	32.4%	85.539	13.1%	1.4%	67.2%	18.3%
1999	31.040	33.7%	92.148	13.2%	1.3%	65.4%	20.1%
2000	33.576	35.0%	95.931	12.2%	1.7%	63.8%	22.3%
2001	26.687	35.0%	76.249	14.5%	1.2%	58.6%	25.6%
2002	24.098	36.0%	66.939	16.5%	1.0%	49.4%	33.1%
2003	24.532	36.5%	67.211	18.9%	1.8%	41.7%	37.6%
2004	26.251	38.5%	68.184	15.3%	0.9%	41.2%	42.5%
2005	26.359	38.3%	68.822	20.5%	0.9%	39.1%	39.6%
2006	26.658	39.0%	68.354	19.7%	0.9%	31.2%	48.2%

Tabla 3. 2. Cambio del consumo de energía primaria por periodos (tasa de crecimiento anual). Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía, varios años.

	1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
Coque de	1.7%	4.8%	-1.8%	2.4%	1.4%

carbón					
Coque de petróleo					2.2%
Diesel	-3.6%	7.0%	-20.4%	2.9%	-0.2%
Combustóleo	0.7%	7.0%	10.3%	-4.6%	-14.3%
Gas natural	3.5%	7.0%	1.1%	6.8%	-3.8%
Electricidad primaria	2.0%	6.3%	5.4%	-0.9%	-5.5%
Total	2.4%	6.1%	2.1%	2.5%	-3.3%

El consumo de energía primaria del sector siderúrgico en México tuvo un crecimiento anual promedio con cierta aceleración durante el período 1970-2006, de 2.4%, y pasó de 121.6 petajoules (PJ) en 1970 a 282.97 PJ en 2006. Dividiendo este período de tiempo, se tiene que entre 1970 y 1980 presentó un crecimiento de 6.1% teniendo en el diesel, el combustóleo y el gas natural el mayor incremento con un 7.0% anual. Por su parte, el coque aumentó 4.8% en el mismo período, mientras la electricidad primaria un 6.1%.

De 1980 a 1990, los ajustes en la economía mexicana ocasionados por las devaluaciones del tipo de cambio, crisis económica, inconsistencia en los precios del petróleo, fueron factores importantes en la evolución del consumo de energía de la industria siderúrgica, presentando un período de transición en la cual la energía primaria creció al 2.1% anual, siendo el combustóleo el de mayor crecimiento con un 10.3%, después la electricidad con un 5.4%, el gas natural 1.1%. El diesel disminuye drásticamente en 20.4% cada año y el coque decrece en 1.8% anual.

De 1990 a 2000, época de la privatización y cambio tecnológico de la industria siderúrgica nacional, la energía primaria crece a un 2.5% anual. El coque de carbón crece 2.4% anual, el diesel (aunque su participación es mínima) crece al 2.9%. El gas natural crece a un 6.8% anual debido al incremento de la reducción directa. El combustóleo disminuye a un ritmo de 4.6% anual, igual que la electricidad a un 0.9% anual.

Finalmente, de 2000 a 2006, el consumo de energía primaria total presenta un decremento de 3.3% anual, debido a la caída de la producción en el año 2001. La electricidad, el diesel y el combustóleo caen a una tasa del 5.5%, 0.2% y 14.3% anual. Por otro lado comienza la utilización del coque de petróleo y el coque de carbón y el coque de petróleo crece a una tasa anual de 1.4%.

La Tabla 3.3 muestra la participación o estructura del consumo de energía por combustible para diversos años. Como puede observarse el coque de petróleo ha ido disminuyendo su importancia, mientras el gas natural y la electricidad han ido aumentando.

Tabla 3. 3. Estructura del consumo de energía por combustibles. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía, varios años.

	1970	1980	1990	2000	2006
Coque de carbón	35.0%	31.0%	21.0%	20.7%	27.4%
Coque de petróleo	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	2.1%
Diesel	3.2%	3.5%	0.3%	0.3%	0.4%
Combustóleo	4.1%	4.5%	9.8%	4.8%	2.3%
Gas natural	29.8%	32.6%	29.8%	45.0%	43.7%
Electricidad primaria	27.8%	28.4%	39.1%	27.8%	24.2%

Los cambios en la evolución del consumo de cada energético se pueden explicar debido al cambio en la tecnología de producción, tanto del hierro, como del acero, como de los productos terminados. Por ejemplo, al aumentar la producción por reducción directa aumentó el consumo de gas natural y al desaparecer el alto horno se vio directamente afectado el consumo de coque, en cuanto a la electricidad se puede explicar por el aumento de la producción de acero por medio de horno de arco eléctrico.

3.2 Consumo específico

La industria siderúrgica ha sufrido una revolución tecnológica en los últimos 40 años. En relativamente poco tiempo, la industria ha observado la desaparición completa del proceso de producción por medio del Alto Horno, así como la amplia adopción de la colada continua y el incremento en la producción de los hornos de arco eléctrico. Estos y otros acontecimientos han afectado drásticamente la manera de producción de acero, el precio, la calidad y la gama de productos generados, y cambiado la estructura básica de la industria. La competencia y la globalización de los mercados seguirán impulsando el desarrollo y la adopción de nuevas tecnologías de la industria siderúrgica.

La energía es un elemento esencial de todas las facetas de la siderurgia, de la reducción de mineral de hierro a hierro fundido, a través de las diferentes fases de transformación y acabado.

El consumo específico de combustible (SEC por sus siglas en inglés) se define como el consumo de energía por unidad de producción. Como los precios de los energéticos están en constante aumento, los objetivos de la industria en cuanto a eficiencia energética se centran en el SEC y la forma en que éste puede ser reducido.

En el caso mexicano el consumo de energía primaria por tonelada de acero crudo producida por fuente de energía se muestra en la Figura 3.2 y en la Tabla 3.4 Aunque el consumo específico de energía ha sufrido altas y bajas, la tendencia general ha estado marcada a la baja, como se puede apreciar en la Figura 3.2.

Tabla 3. 4. Consumo específico de energía (GJ/ton). Resultados propios con base en balance de energía e INEGI, varios años.

	coque carbón	coque petróleo	Diesel	Combustóleo	electricidad primaria	SECp
1970	10.98	0.00	1.00	1.29	9.35	31.33
1971	11.54	0.00	1.00	1.29	9.34	31.74
1972	11.02	0.00	1.00	1.29	9.35	29.83
1973	11.79	0.00	1.00	1.29	9.35	31.94
1974	11.28	0.00	1.00	1.29	9.34	31.95
1975	10.71	0.00	1.00	1.29	9.34	31.62
1976	11.53	0.00	1.00	1.29	9.34	32.21
1977	11.74	0.00	1.00	1.29	9.34	32.35
1978	10.22	0.00	1.00	1.29	9.34	30.38
1979	9.83	0.00	1.00	1.29	9.34	29.99
1980	8.92	0.00	1.00	1.29	9.34	29.11
1981	8.87	0.00	1.00	1.29	9.35	28.64
1982	9.13	0.00	1.00	1.29	9.35	29.02
1983	9.08	0.00	1.00	1.29	9.34	28.86
1984	8.43	0.00	1.00	1.29	9.34	28.28
1985	8.71	0.00	1.00	1.29	9.34	28.56
1986	8.43	0.00	1.00	1.29	9.34	27.05
1987	8.72	0.00	0.97	1.31	9.87	28.18
1988	8.34	0.00	0.21	3.14	12.31	36.23
1989	8.07	0.00	0.26	3.38	9.53	34.80
1990	6.47	0.00	0.09	3.02	9.19	30.84
1991	6.39	0.00	0.09	3.10	9.79	29.95
1992	6.91	0.00	0.10	1.65	9.06	27.69
1993	6.40	0.00	0.09	1.87	7.79	23.25
1994	6.40	0.00	0.09	1.87	7.29	22.80
1995	6.18	0.00	0.10	1.64	6.49	21.42
1996	6.06	0.00	0.09	1.77	7.88	22.66
1997	6.04	0.00	0.09	1.68	8.39	22.48
1998	6.05	0.00	0.09	1.69	8.20	22.06
1999	5.68	0.00	0.08	1.36	8.32	21.46
2000	4.57	0.33	0.07	1.06	9.96	22.12
2001	5.18	0.16	0.06	0.99	8.80	20.92
2002	5.41	0.22	0.05	0.75	7.78	18.98
2003	4.75	0.00	0.05	0.71	7.56	17.50
2004	4.47	0.00	0.05	0.68	7.31	16.59
2005	4.71	0.00	0.05	0.71	7.58	17.30
2006	4.71	0.35	0.06	0.40	7.52	17.21

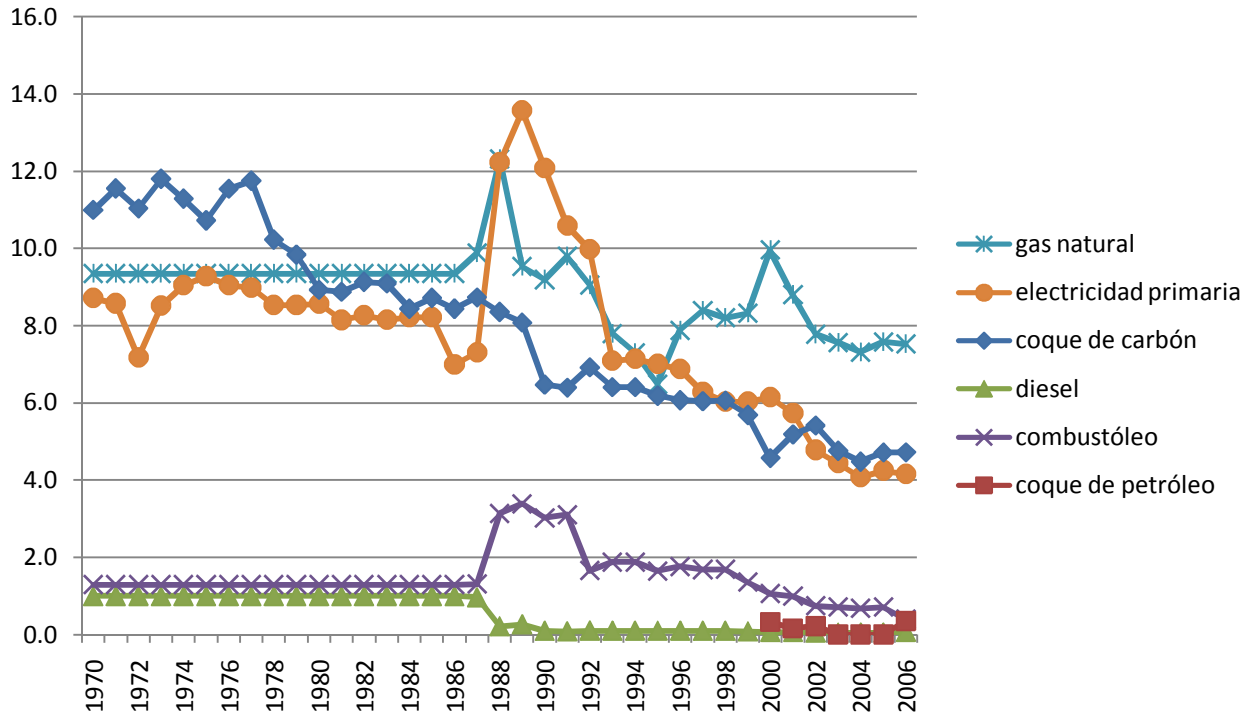


Figura 3. 2. Consumo específico de energía primaria de la industria siderúrgica nacional. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).

Como lo muestra la gráfica, el coque de carbón es quien ha sufrido la caída más pronunciada, asociado principalmente al cierre del hogar abierto y el aumento del arco eléctrico y del convertidor básico al oxígeno. Sin embargo la electricidad primaria también tiene una caída significativa. En este caso y en el combustóleo, los años de 1988 a 1993 presentan un consumo específico de energía primaria (SECp por sus siglas en inglés) muy altos, sin embargo, no está clara la razón de este comportamiento.

El consumo específico de energía primaria del sector siderúrgico en México pasó de 31.33 [GJ/ton] en 1970 a 17.205 [GJ/ton] en 2006, lo que significó una caída del 45%. Esto significa un aumento en la eficiencia de producción sumamente significativo.

Para tener una mejor idea de la tendencia del SECp, se analiza dividiendo todo el período en etapas (Tabla 3.5). Así, entre 1970 y 1980 el decremento anual fue de 0.7%. Entre 1980 y 1990 se presenta un incremento anual del SECp de 0.6%, entre 1990 y 2000 una disminución del 3.3%, que es la década de mayores cambios tecnológicos y entre 2000 y 2006 una disminución del 4.1%.

En el período, el diesel y el combustóleo se mantuvieron casi constantes, mostrando ambos un ligero crecimiento, dejando así al SECp con un valor de 29.114 [PJ/Mton] en 1980, creciendo solo de 1970 a 1980 en 0.39 [PJ/Mton].

Tabla 3. 5. Cambio en el consumo específico de energía por períodos. Elaboración propia.

	1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
coque carbón	-2.3%	-2.1%	-3.2%	-3.4%	0.5%
coque petróleo					1.3%
Diesel	-7.4%	0.0%	-21.4%	-2.9%	-1.0%
Combustóleo	-3.2%	0.0%	8.9%	-10.0%	-15.1%
electricidad primaria	-0.6%	0.0%	-0.2%	0.8%	-4.6%
SECp	-1.7%	-0.7%	0.6%	-3.3%	-4.1%

Para el periodo de 1980 a 1990, el SECp final creció en 0.6%, como lo muestra la Tabla 3.5, pasando de 29.11 [PJ/Mton] en 1980 a 30.84 [PJ/Mton] en 1990, éste periodo se caracterizó por la casi desaparición del diesel, pasando de 0.997 [PJ/Mton] en 1981 a 0.089 [PJ/Mton] en 1990, el aumento de combustóleo de 1.29 a 3.02 [PJ/Mton] en el periodo en cuestión, la caída del coque de carbón de 8.92 a 6.47 [PJ/Mton], mientras que el gas natural permaneció casi constante, con una ligera variación a la baja de 0.15 [PJ/Mton], por último la electricidad aumentó, al mostrar un incremento de 3.51 [PJ/Mton]. Estas variaciones se pueden explicar con los mismos criterios antes mencionados, como lo es la contracción de la economía mexicana, entre otros.

Después de 1990 y hasta el año 2000, el valor de la producción de acero aumentó casi el doble, pasando de un valor de 8.734 [Mton] en 1990 a 15.631[Mton] en 2000, a pesar de este aumento tan considerable en la producción, la tendencia del SECp fue a la baja, con una reducción de 8.73 [PJ/Mton] en el período de 1990 a 2000. A pesar de que el SECp del gas natural obtuvo un aumento de 0.77 [PJ/Mton], en general, el resto de las fuentes tuvieron un decremento. Aun cuando se pueden apreciar variaciones anuales (Figura 4.3), el comportamiento del SECp en todo el periodo 1990-2000, se mantiene a la baja, registrando el coque de carbón una caída de 1.90 [PJ/Mton], el combustóleo 1.97 [PJ/Mton] y a la electricidad sufrió la caída más notoria del SECp, pues el pasó de 12.07 [PJ/Mton] en 1990 a 6.14 [PJ/Mton] en 2000. A pesar de que la producción con horno de arco eléctrico aumentó de 4.491 [Mton] en 1990 a 10.395 [Mton] en 2000, la razón de que el SECp bajara, se puede explicar por los avances en la tecnología de fabricación, aumentando los niveles de producción y disminuyendo el consumo de energía por unidad producida.

De 2000 a 2006, el SECp tuvo una tendencia a la baja en casi todo el periodo, aunque en los últimos años se registró un aumento. Aun cuando el coque de carbón aumento de 0.15 [PJ/Mton] entre 2000 y 2006, el diesel se mantuvo casi constante, al pasar de 0.07 [PJ/Mton] en 2000 a 0,0626 [PJ/Mton] en 2006, la electricidad pasó de 6.14 [PJ/Mton] en 2000 a 4.16 [PJ/Mton] en 2006, el gas natural fue el que sufrió la baja más pronunciada, al caer 2.44 [PJ/Mton] entre 2000 y 2006, el combustóleo también se vio afectado, al caer 0.66 [PJ/Mton] de 2000 a 2006.

Las proporciones relativas de uso de los diferentes combustibles dependen de varios factores. Estos factores incluyen la disponibilidad local, los precios de los combustibles y las necesidades de equipo para la mejor utilización de cada combustible. Además de que las repercusiones ambientales también ayudan en la decisión de que combustible es el mejor para la producción de acero.

Los procesos de producción han sufrido una gran cantidad de cambios tecnológicos, que ayudan a hacer más eficiente el SECp, éstos cambios son los que permiten una producción con un consumo menor de energéticos, además de que las emisiones contaminantes también se van minimizando hasta tener los valores reportados hoy en día.

Los aumentos de la productividad y el rendimiento asociado a la colada continua, han tenido un efecto dramático en la industria del acero en todo el mundo. La colada continua ayuda a bajar los consumos de energía, al hacer más eficiente la producción de productos de acero.

CAPÍTULO 4.

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA, 1970-2006

Este capítulo estudia las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria siderúrgica mexicana para el período de 1970-2006, definiendo los gases que se tomarán en cuenta para el análisis de las emisiones. El presente capítulo se apoya en datos y figuras de estudios internacionales, describiendo brevemente al efecto invernadero y al cambio climático global, además se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero del consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana y las emisiones por unidad de producto.

4.1 Efecto invernadero y cambio climático global

Los *gases de efecto invernadero* (GEI) presentes en la atmósfera de la Tierra, reflejan la radiación infrarroja emitida por su superficie. Esta radiación, vuelve a reflejarse nuevamente por la superficie (con excepción de las pérdidas), y a su vez vuelve a ser reflejada por los GEI. Esto provoca una "retención de calor" de la superficie de la Tierra. Gracias a este fenómeno, la superficie de la Tierra tiene una temperatura media de +14°C. De no ser por estos gases, la temperatura sería de -19°C, imposible para la vida como se conoce en el planeta. Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H₂O), el *dióxido de carbono* (CO₂), el *óxido nitroso* (N₂O), el *metano* (CH₄), el *ozono* (O₃) troposférico y algunos otros como los halo-carbonos. Sin embargo, el vapor de agua tiene una vida muy corta en la atmósfera, pues se transforma constantemente por el ciclo del agua, mientras que los otros GEI tienen larga vida, es decir, una vez que se emiten, permanecen por varias decenas o centenas de años en la atmósfera (IPCC, 2001).

La emisión de los GEI se produce por actividades naturales como la respiración o las erupciones volcánicas y por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación, actividades agropecuarias y actividades industriales. De acuerdo con mediciones, observaciones y modelos de diversos científicos, que están plasmados en los reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés)¹, los GEI han venido incrementándose durante las últimas décadas, producto

¹ El IPCC es una organización de científicos de todo el mundo que fue establecida conjuntamente en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el mandato de analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas. Desde 1992 esta organización, a

principalmente de actividades humanas. Esto ha provocado un aumento en la temperatura del planeta, provocando el llamado Cambio Climático Global (IPCC, 2007). De no limitarse las emisión de los GEI, la temperatura del planeta seguirá aumentando, provocando diversos efectos como la elevación del nivel del mar, cambios en el patrón de las precipitaciones, disminución de glaciares, etc.

Los principales gases que produce la quema de combustibles fósiles son el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso.

Dióxido de carbono (CO₂)

Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la quema de *combustibles fósiles* y *biomasa*, cambios en el *uso de los suelos* y otros procesos industriales. Es el principal *gas antropogénico de efecto invernadero* que afecta al *equilibrio de radiación* del planeta.

Metano (CH₄)

Un hidrocarburo que es un *gas de efecto invernadero*, producido por la descomposición anaeróbica (sin oxígeno) de residuos en vertederos, digestión animal, descomposición de residuos animales, producción y distribución de gas natural y petróleo, producción de carbón, y combustión incompleta de *combustibles fósiles*.

Óxido nitroso (N₂O)

Un potente *gas de efecto invernadero* emitido por los usos de cultivos en tierras, especialmente el uso de fertilizadores comerciales y orgánicos, la quema de *combustibles fósiles*, la producción de ácido nítrico, y la quema de *biomasa*.

En la Figura 4.1 se presentan gráficas del IPCC que muestran los registros de los cambios en la composición de la atmósfera durante el último milenio. Datos tempranos y esporádicos a partir del aire atrapado en el hielo (símbolos) coinciden con las observaciones atmosféricas continuas en décadas recientes (línea sólida). El CO₂ se encuentra bien mezclado en la atmósfera, y su concentración refleja las emisiones desde fuentes situadas en todas partes del mundo (IPCC, 2007). La Figura 4.2 muestra los cambios en la temperatura.

la que pertenecen más de 2000 científicos del mundo, es un apoyo para la determinación de las políticas internacionales que establece la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC). En el año 2007, el IPCC publicó su cuarto reporte y por su contribución a este tema, obtuvo el premio nobel de la Paz. La mayor parte de la información que se presenta en este artículo, proviene de este reporte.

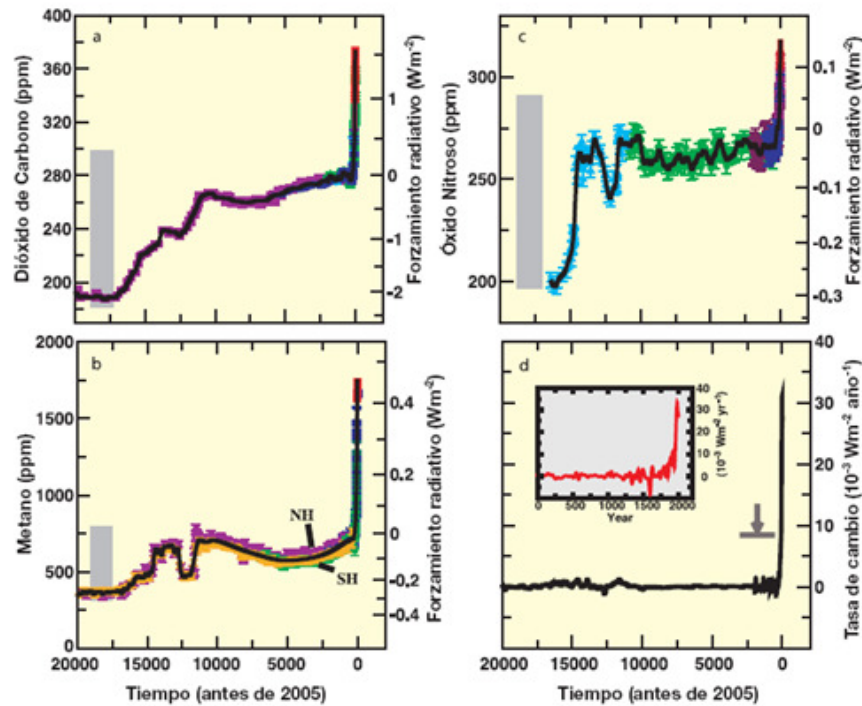


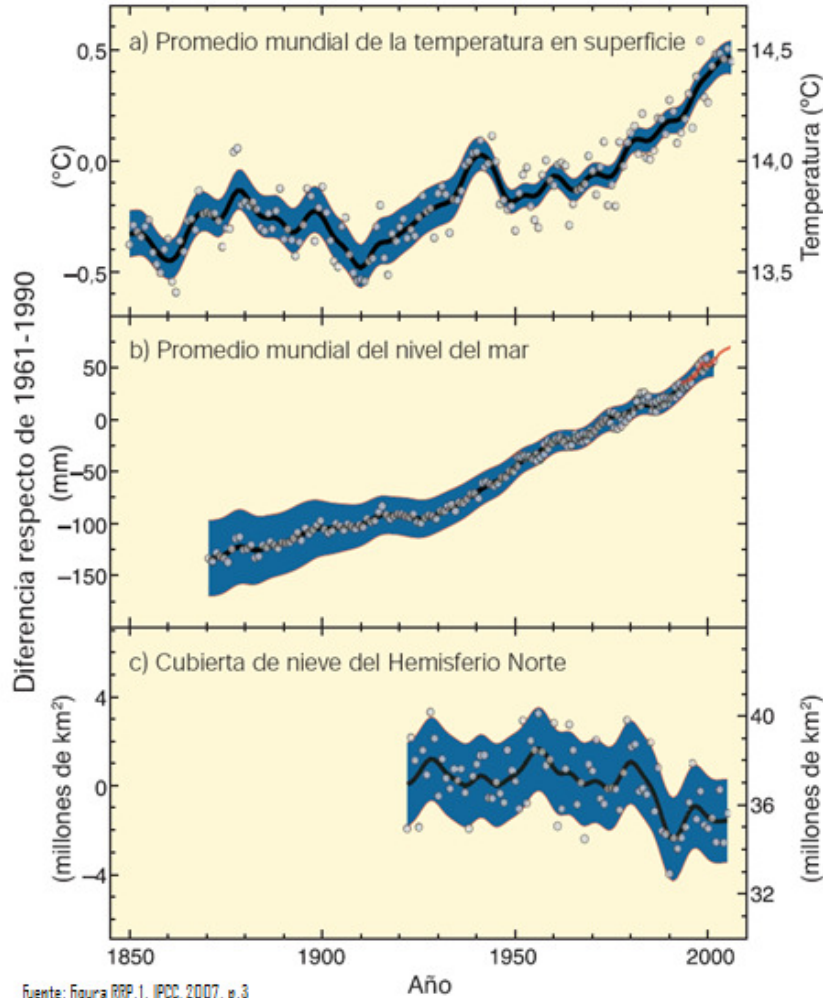
Gráfico RT2. IPCC, 2007a, p. 25

Concentraciones y forzamiento radiativo del (a) dióxido de carbono (CO_2), (b) metano (CH_4), (c) y óxido nítrico (N_2O) y (d) la tasa de cambio de de su forzamiento radiativo combinado durante los últimos 20.000 años reconstruidas a partir del hielo antártico y de Groenlandia y datos de nieve granular (símbolos) y mediciones atmosféricas directas (paneles a,b,c, líneas rojas). Las barras grises muestran los niveles de variabilidad natural reconstruidos durante los últimos 650.000 años. La tasa de cambio del forzamiento radiativo (panel d, línea negra) se calculó mediante una curva en los datos de concentración. La edad se calculó con datos que varían desde aproximadamente veinte años para sitios con gran acumulación de nieve como Law Dome, Antártida, hasta aproximadamente de 200 años para lugares con poca acumulación como Dome C, Antártida. La flecha muestra el pico en la tasa de cambio del forzamiento radiativo que resultaría si las señales antropogénicas de CO_2 , CH_4 , y N_2O se suavizaran relacionadas con las condiciones de baja acumulación en el sitio Dome C. La tasa de cambio negativa del forzamiento de aproximadamente 1.600 muestra la inserción de alta resolución en los resultados del panel debido a la disminución del CO_2 de 10 ppm en el registro del Law Dome.

Figura 4. 1. Cambios en los Gases de Efecto Invernadero de datos de Núcleo de Hielo y actuales. IPCC, 2007.

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar.

De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores (Figura 4.2). Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos (IPCC, 2007).



Variación observada de: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo-abril. Todas las diferencias han sido calculadas respecto de los promedios correspondientes durante el periodo 1961-1990. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis completo de las incertidumbres conocidas (a y b) y de la serie temporal c).

Figura 4. 2. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte. IPCC, 2007.

El aumento de nivel del mar concuerda con este calentamiento. En promedio, el nivel de los océanos mundiales ha aumentado desde 1961 a un promedio de 1.8 [entre 1.3 y 2.3] mm/año, y desde 1993 a 3.1 [entre 2.4 y 3.8] mm/año, en parte por efecto de la dilatación térmica y del deshielo de los glaciares, de los casquetes de hielo y de los mantos de hielo polares. No es posible dilucidar hasta qué punto esa mayor rapidez evidenciada entre 1993 y 2003 refleja una variación decenal, o bien un aumento de la tendencia a largo plazo.

La disminución observada de las extensiones de nieve y de hielo concuerda también con el calentamiento. Datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que el promedio anual de la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en un 2.7 [entre 2.1 y 3.3] % por decenio, con disminuciones estivales aun más acentuadas, de 7.4 [entre 5.0 y 9.8] % por

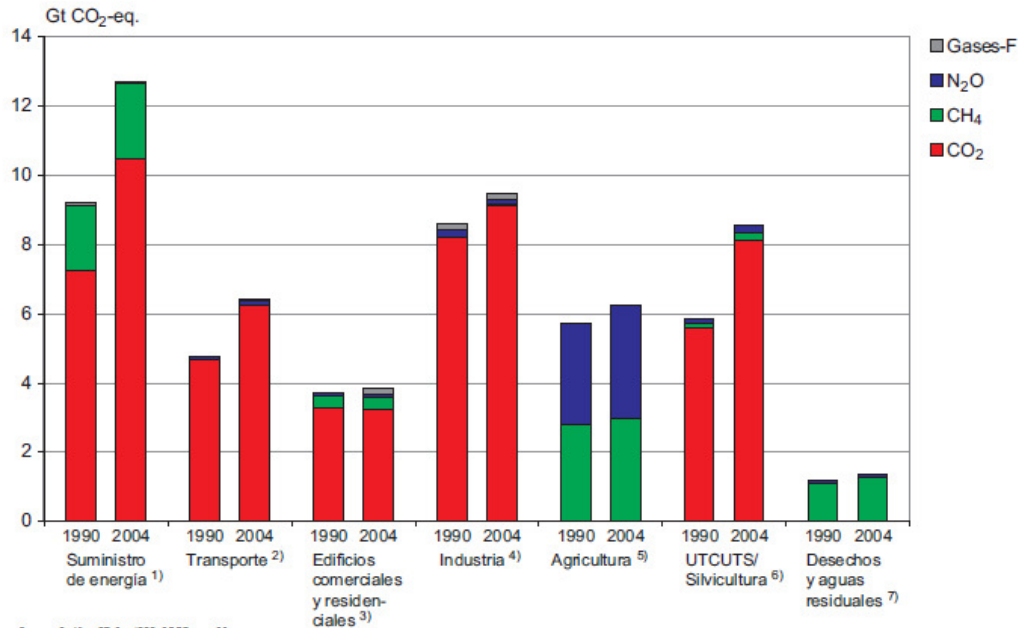
decenio. En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios (IPCC, 2007).

De acuerdo con el cuarto reporte del IPCC, entre 1900 y 2005, la precipitación pluvial aumentó notablemente en las partes orientales del norte de América del Sur y del Norte, Europa septentrional, y Asia septentrional y central, aunque disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África y en ciertas partes del sur de Asia. Los glaciares montañosos y la cobertura de hielo ha disminuido en ambos hemisferios. Los escenarios futuros muestran que de seguir las tendencias en el incremento de emisiones de GEI, la temperatura se incrementará entre 2000 y 2100 de 1.8°C a 4°C (entre los rangos de 1.1 y 2.9°C a 2.4 y 6.4°C según el escenario) y el nivel del mar se incrementará de 0.28m a 0.43m (entre los rangos de 0.18 y 0.38m a 0.26 y 0.59m).

Los impactos del aumento en la temperatura de la superficie de la Tierra y el nivel del mar tendrán mayores efectos en la precipitación pluvial (dependiendo de la región del planeta), incidencia de fenómenos extremos como ciclones, y por ende en prácticamente todas las actividades económicas, particularmente la agropecuaria; implicaciones en la disponibilidad de agua potable, cambios en los factores que transmiten enfermedades y consecuencias sociales, como la migración

Otros reportes del IPCC (2002) establecen que se espera que el cambio climático afecte a todos aspectos de la biodiversidad. Sin embargo, dichos cambios tienen que tener en cuenta los impactos de otras actividades humanas pasadas, presentes y futuras, incluyendo el aumento en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂). Se espera que el cambio climático afecte directamente a organismos individuales, a poblaciones, a la distribución de especies, y al funcionamiento de los ecosistemas (por ejemplo debido a un aumento de las temperaturas y cambios en las precipitaciones en el caso de ecosistemas marinos y costeros, se esperan cambios en el nivel del mar y fuertes tormentas repentinas) e indirectamente (por ejemplo mediante el impacto de los cambios climáticos en la intensidad y la frecuencia de fenómenos tales como los fuegos arrasadores). La pérdida, modificación y fragmentación del hábitat, y la introducción y extensión de especies no autóctonas van a afectar los impactos producidos por el cambio climático. Una proyección realista del estado futuro de los ecosistemas terrestres debe tener en cuenta también las pautas de uso de los suelos y del agua, las que van a afectar en gran medida a la capacidad de los organismos para responder a los cambios climáticos mediante la migración.

Entre el año 1970 y el 2004, las emisiones de los GEI crecieron en un 70%. Sin embargo, las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de combustibles fósiles lo hicieron en un 80%. La Figura 4.3, muestra las emisiones mundiales por fuente, de acuerdo con el IPCC (2007).



Fuente: Gráfico RT.2a. IPCC, 2007c, p. 29

Emisiones de GEI por sectores en 1990 y 2004. Se utilizó el PCM de 100 años del IPCC 1996 [Segundo Informe de Evaluación (SIE) para convertir las emisiones a CO₂-eq. La incertidumbre en el gráfico es mayor para el CH₄ y N₂O (en el orden del 30-50%) y aún mayor para el CO₂ de la agricultura y silvicultura. Para la quema de biomasa a gran escala se utilizaron datos promediados de la actividad para 1997-2002 procedentes de la base de datos de Emisiones Mundiales de Incendios basada en datos vía satélite. Las emisiones de turba (incendios y desintegración) se basan en datos recientes del Grupo de Hidráulica de la Universidad de Delft.

- 1) Excluidos refinerías, hornos de coque, etc., los cuales se incluyen en Industria.
- 2) Incluido el transporte Internacional (buques), excluida la pesquería. Excluidos los vehículos y maquinarias agrícolas y del sector de la silvicultura que no usan en carreteras.
- 3) Incluido el uso tradicional de biomasa. En el Capítulo 6 las emisiones se describen sobre la base de distribución por uso final (Incluida la fracción correspondiente al sector de las emisiones causadas por la generación centralizada de energía) de manera que cualquier logro de mitigación en el sector como resultado de un menor uso de la electricidad se atribuye al sector.
- 4) Incluidas refinerías, hornos de coque, etc. Las emisiones descritas en el Capítulo 7 también se analizan sobre la base de la distribución por uso final (Incluida la fracción correspondiente al sector de las emisiones causadas por la generación centralizada de energía) de manera que cualquier logro de mitigación en el sector como resultado de un menor uso de la electricidad se atribuye al sector.
- 5) Incluida la quema de desechos agrícolas y quema de sabanas (exentas de CO₂). En esta base de datos no se estiman las emisiones y/o eliminación de CO₂ procedentes de suelos agrícolas.
- 6) Los datos incluyen emisiones de CO₂ de la deforestación, emisiones de CO₂ de la desintegración (descomposición) de la biomasa encima del suelo que permanece después de la explotación forestal y deforestación, y CO₂ de incendios de turbas y desintegración de suelos de turba drenados. El Capítulo 9 sólo describe las emisiones de la deforestación.
- 7) Incluidos el CH₄ de vertederos, el CH₄ de aguas residuales y el N₂O y CO₂ de la incineración de desechos (solamente carbono fósil).

Figura 4. 3. Emisiones de GEI en el planeta. IPCC, 2007.

En 1992, las Naciones Unidas crearon la Convención Marco de Cambio Climático con el objetivo de “lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”. Para ello, y sustentados en que “las partes deberán proteger el sistema climático de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas”, se creó en 1997 el llamado Protocolo de Kioto, el cual entró en vigor hasta 2005, sin que Estados Unidos, el país que emite cerca del 25% de las emisiones de GEI, lo haya firmado hasta la fecha.

Dado que el cambio climático es ya una realidad, los países deben establecer políticas tendientes a integrar una doble estrategia, la de la adaptación al cambio climático y la de la mitigación. En el caso de la mitigación para el sector energético, las opciones

implican un menor consumo, es decir mayor eficiencia del lado de la oferta y la demanda; sustitución de combustibles fósiles por aquellos que no contienen carbono, como la nuclear y las renovables y otras tecnologías que se encuentran en investigación como el almacenamiento de carbono.

4.2 Emisiones de GEI de la industria siderúrgica

Se estima que la industria siderúrgica mundial, emite cerca de 1600 millones de toneladas (MtCO₂), incluyendo emisiones de la manufactura de coque y emisiones indirectas del consumo de electricidad, es decir entre 6 y 7% de las emisiones antropogénicas totales (Kim y Worrell, 2002).

Las emisiones de la industria siderúrgica son generadas por:

- Gases liberados durante el proceso de producción
- Consumo de combustibles fósiles
- Consumo de electricidad proveniente de combustibles fósiles

Durante el proceso de producción, las emisiones provienen principalmente de la interacción química entre el carbón y el coque (carbono) y el mineral de hierro en el alto horno (World Steel Association, 2008). La quema de combustibles fósiles se refiere a la combustión de carbón y sus derivados, petróleo y sus derivados y gas natural, y finalmente el consumo de electricidad produce emisiones en la generación de las mismas, dependiendo de los combustibles que se utilizan.

4.3 Estimación de emisiones de GEI del consumo de energía de la industria siderúrgica mexicana

En este trabajo se calculan solamente las emisiones de GEI asociadas al consumo de energía de la industria siderúrgica nacional. Para ello, se utiliza la metodología del IPCC (1996), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CO_{2t} = \sum_j E_{jt} * FE_j * FO_j * (44/12) \quad (4.1)$$

Donde

CO_{2t} = Emisiones de CO₂ en el año t

E_{jt} = Consumo del combustible j en el año t

FE_j = Factor de emisión del combustible j

FO_j = Factor de oxidación del combustible j

44/12 es el peso molecular del carbón entre el oxígeno

Para calcular las emisiones, los factores de emisión provienen de la metodología del IPCC (1996). De acuerdo con la misma, los factores de oxidación se presentan en la Tabla 4.1 y los factores de emisión en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 1. Fracción de carbono oxidado. IPCC, 1996.

Carbón	0.98
Petróleo y productos	0.99
Gas	0.995
Peat para generación eléctrica	0.99

Tabla 4. 2. Factores de emisión de CO₂, incluyendo fracción oxidable (TCO₂/TJ). IPCC, 1996.

Carbón	92.708
Consensados	62.751
Coque carbón	92.708
Coque petróleo	99.825
GLP	62.436
Diesel	73.326
Combustóleo	76.593
Gas natural	55.820

Las emisiones de CO₂ están determinadas por el contenido de carbono en el combustible debido a que prácticamente todo el combustible que se quema, con excepción del que no se oxida (factor de oxidación), se convierte de CO₂. Por ello, el IPCC recomienda utilizar el factor de emisión en gramos de CO₂ por energía (joule).

En el caso del CH₄ y el N₂O, las emisiones dependen de la tecnología, sin embargo, para la industria, se recomienda usar también factores de emisión por unidad de energía. La ecuación para calcular los gases diferentes al CO₂ es la siguiente:

$$N_2O_t = \sum_j E_{jt} * FE_j \quad ; \quad N_2O_t = \sum_j E_{jt} * FE_j \quad ; \quad (4.2)$$

El IPCC ha establecido factores de emisión para el caso de la industria para los diversos combustibles, los cuales se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Factores de emisión CH₄ y N₂O para industria siderúrgica. IPCC, 1996.

	CH ₄ Kg/TJ	N ₂ O Kg/TJ
Carbón	0.7	1.6
Coque carbón	0.7	1.6
Coque petróleo	3	0.3
Diesel	2	0.06
Combustóleo	2	0.3
Gas natural	1.4	0.1

Por otro lado, las emisiones debidas a la generación eléctrica por el consumo de electricidad de la industria siderúrgica, se calculan considerando la electricidad primaria (consumo de electricidad dividido entre la eficiencia) y el porcentaje de cada combustible fósil utilizado para generar la electricidad, por su factor de emisión, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$GEI_t = \sum \epsilon_t * [j/\sum j]_t * FE_j \quad (4.3)$$

Donde

ϵ_t = electricidad primaria (electricidad/eficiencia) para el año t

$[j/\sum j]_t$ = porcentaje del combustible fósil j que se utilizó en el año t para generar electricidad

FE_j = Factor de emisión del combustible j

La electricidad primaria y el porcentaje de generación por combustible se muestran en la Tabla 3.1. Los factores de emisión para calcular las emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica son los mismos que los de la Tabla 4.2 y los factores de emisión para los otros gases se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Factores de emisión CH₄ y N₂O para generación eléctrica (Kg/TJ). IPCC, Manual de referencia V III, 1996.

	CH ₄	N ₂ O
Carbón	0.7	1.6
Diesel	0.9	0.04
Combustóleo	0.9	0.03
Gas natural	6	0.1

A los últimos dos factores de la ecuación 4.3, ($[j/\sum j]_t * FE_j$) pueden reconocerse como el factor de emisión de la electricidad. El factor de emisión de la electricidad varía para cada año, debido a que la estructura de generación por combustible es diferente. El factor de emisión de la generación eléctrica se muestra en la Tabla 4.5 para cada año.

Tabla 4. 5. Factor de emisión para generación eléctrica (Kg/TJ). Elaboración propia del balance de energía y factores de emisión IPCC, 1996.

	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
1970	68.60	0.08	2.86
1971	68.86	0.07	2.80
1972	70.03	0.07	2.51
1973	70.51	0.06	2.37
1974	71.55	0.06	2.09
1975	70.69	0.06	2.25
1976	71.96	0.06	1.96
1977	72.40	0.05	1.88
1978	71.93	0.05	1.96
1979	70.64	0.05	2.28
1980	71.64	0.05	2.05
1981	71.92	0.05	1.98
1982	72.43	0.08	1.95
1983	73.78	0.10	1.72
1984	74.70	0.12	1.53
1985	74.83	0.13	1.54
1986	74.87	0.17	1.63
1987	74.98	0.18	1.61
1988	75.38	0.19	1.54
1989	75.30	0.18	1.54
1990	74.57	0.17	1.70
1991	74.12	0.18	1.81
1992	74.41	0.18	1.76
1993	74.92	0.22	1.72
1994	75.05	0.22	1.70
1995	75.02	0.26	1.79
1996	75.44	0.29	1.76
1997	75.28	0.26	1.74
1998	74.85	0.25	1.81
1999	74.49	0.25	1.90
2000	73.88	0.24	2.01
2001	73.57	0.28	2.18
2002	72.34	0.31	2.56
2003	71.77	0.35	2.78
2004	70.19	0.30	3.04
2005	71.65	0.38	2.88
2006	69.72	0.37	3.32

Las emisiones equivalentes de CO₂ se calculan de acuerdo a la fuerza radiativa del CH₄ y del N₂O determinada en la metodología del IPCC (1996), como:

$$\text{Emisiones de CO}_2\text{eq.} = \text{emisiones de CO}_2 + \text{emisiones de CH}_4 * 21 + \text{emisiones de N}_2\text{O} * 310$$

De acuerdo con esta metodología y el consumo de energía reportado en el capítulo anterior, las emisiones de GEI en CO₂ equivalente por combustible entre 1970 y 2006 se muestran en la Figura 4.4.

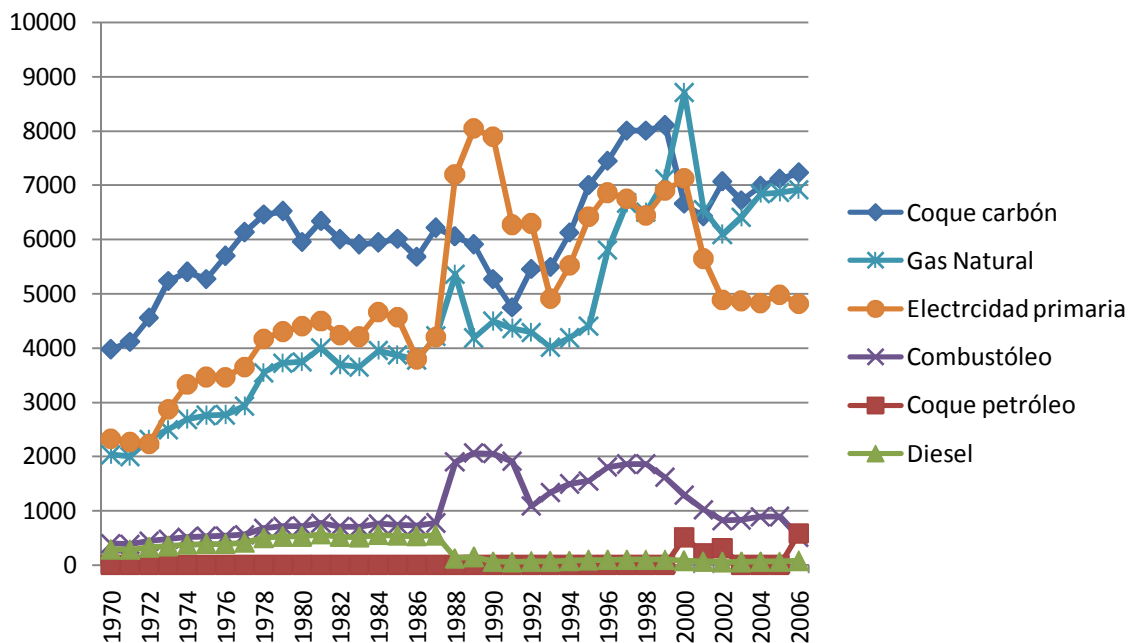


Figura 4. 4. Emisiones de GEI de la industria siderúrgica nacional (Gg de CO₂ eq.). Elaboración propia del balance de energía y factores de emisión IPCC, 1996.

Sus valores y tasas de crecimiento por periodo se presentan en las Tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4. 6. Emisiones de CO₂ equivalente de la quema de combustibles de la industria siderúrgica mexicana (Gg). Elaboración propia del balance de energía y factores de emisión IPCC, 1996.

	1970	1980	1990	2000	2006
Coque carbón	3973.17	5948.85	5263.87	6655.07	7227.99
Coque petróleo	0.000	0.00	0.00	510.70	581.19
Diesel	284.15	523.83	57.24	76.40	75.52
Combustóleo	389.51	718.12	2051.53	1284.25	507.80
Gas Natural	2026.76	3736.80	4486.04	8699.27	6912.41
Electricidad primaria	2331.16	4401.11	7887.78	7127.60	4818.28
Total	9004.75	15328.71	19746.47	24353.28	20123.23

Tabla 4. 7. Tasa de crecimiento anual de las emisiones de GEI por periodo. Elaboración propia del balance de energía y factores de emisión IPCC, 1996.

	1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
Coque carbón	1.7%	4.1%	-1.2%	2.4%	1.4%
Coque petróleo					2.2%
Diesel	-3.6%	6.3%	-19.9%	2.9%	-0.2%
Combustóleo	0.7%	6.3%	11.1%	-4.6%	-14.3%
Gas Natural	3.5%	6.3%	1.8%	6.8%	-3.8%
Electricidad primaria	2.0%	6.6%	6.0%	-1.0%	-6.3%
Total	2.3%	5.5%	2.6%	2.1%	-3.1%

Para el año 2006, las emisiones de CO₂eq. de la industria siderúrgica nacional alcanzaron 20.123 Gg., 123% más que en 1970. La tasa de crecimiento anual de todo el periodo fue de 2.3%, ligeramente menor que el consumo de energía. El periodo de mayor crecimiento de las emisiones fue de 1970-1980 y el de menor el de 2000 a 2006, por la caída en la producción de ese periodo. La Tabla 4.8 presenta las emisiones totales de cada gas de efecto invernadero, con su potencial de calentamiento. El 99% de las emisiones corresponden al CO₂.

Tabla 4. 8. Emisiones de gases de efecto invernadero por gas para 2006 (Gg de CO₂ equivalente). Elaboración propia del balance de energía y factores de emisión IPCC, 1996.

	1970	1980	1990	2000	2006
CO ₂	8964.8	15269.7	19660.1	24248.7	20015.7
CH ₄	9.4	12.5	14.0	21.3	25.2
N ₂ O	30.6	46.4	72.4	83.3	82.4
Total	9004.7	15328.7	19746.5	24353.3	20123.2

Aun cuando hay un cambio importante en la estructura del consumo de combustibles como se muestra en el capítulo anterior, que influye en las emisiones debido a que los factores de emisión de cada combustible son distintos, el cambio en las emisiones es muy similar al del consumo de energía.

Esto se debe a que la disminución en la participación del coque en la industria siderúrgica se ve opacado por el aumento de la participación del carbón en la generación eléctrica. En la Tabla 4.5 puede apreciarse que hasta 1995, aumenta el factor de emisión de la electricidad. Después disminuye ligeramente por la participación del gas natural en la generación.

4.4 Emisiones por unidad de producto

Emisiones por unidad de producto.

Se definen como la cantidad de emisiones por unidad de acero crudo producido. En la Figura 4.5, se muestra la tendencia de este indicador para el periodo de 1970 a 2006, el cual registró una caída del 47% para todo el periodo. Esto significa que en el año 2006,

cada tonelada de acero producido en México generó 47% menos emisiones de gases de efecto invernadero, que en 1970.

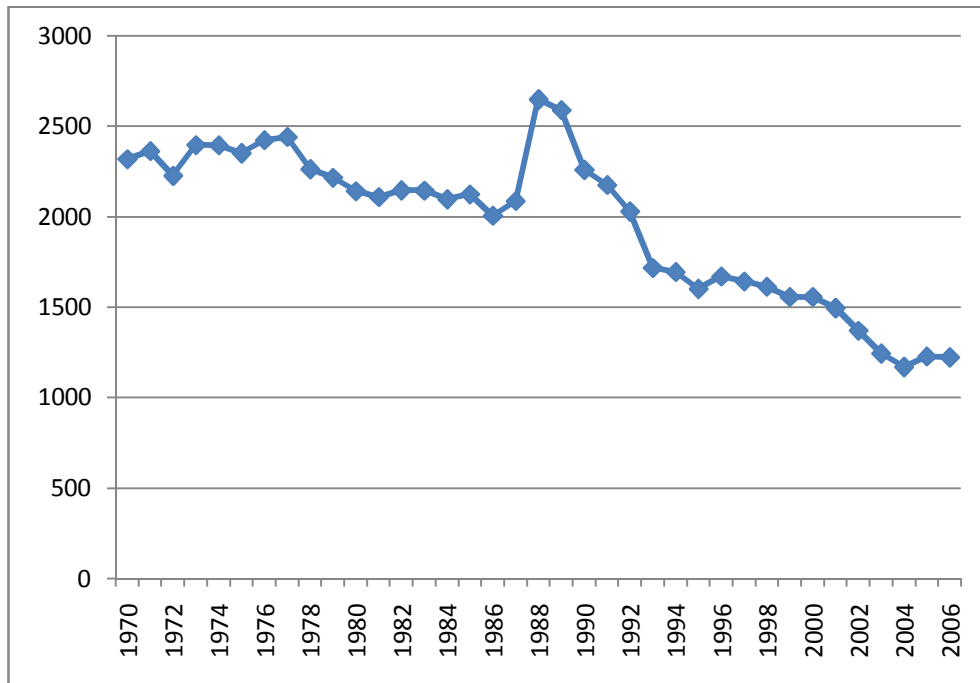


Figura 4. 5. Total de emisiones por unidad de producto. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).

La disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero por tonelada de acero producido puede deberse a dos razones principales. La primera es que se utilicen más combustibles con menor factor de emisión. Por ejemplo, el gas natural tiene un menor factor de emisión que el coque de carbón. Si se usa más gas en sustitución del coque, pues disminuyen las emisiones por acero producido. Esto incluye a la electricidad primaria. Si en la generación eléctrica se usan combustibles con menor factor de emisión, entonces las emisiones por unidad de producto serán menores. La segunda es mayor eficiencia en todos los procesos, es decir si el consumo específico de energía es menor, pues se quemarán menos combustibles y las emisiones serán menores.

Al presentar las emisiones por unidad de producto por combustible, pueden analizarse con más claridad las razones de la disminución (Figura 4.6). Como puede observarse, las emisiones por unidad de acero producido disminuyen en todos los casos, aunque destaca la reducción del coque de carbón y en los últimos años, de la electricidad primaria.

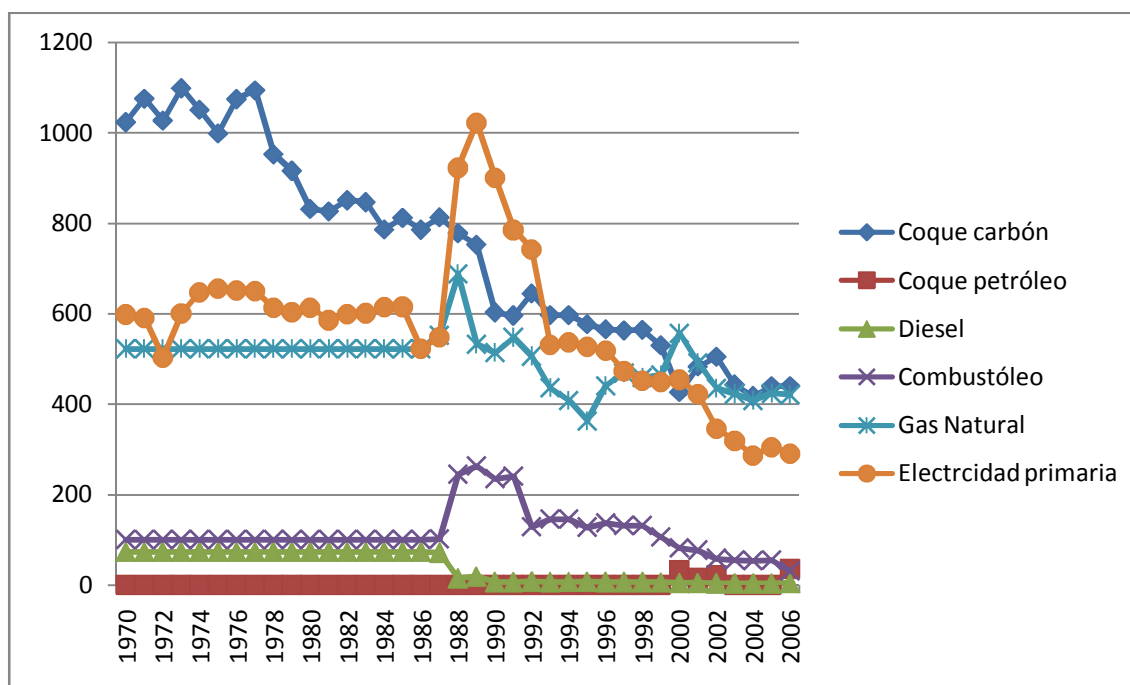


Figura 4. 6. Emisiones por unidad de producto. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).

Puede apreciarse también que entre 1989 y 1993 aumentan las emisiones por unidad de producto de la electricidad primaria, el gas y el combustóleo, los cuales aun cuando hay que realizar mayor investigación en este respecto, estas pueden deberse que en periodo de ajuste en el proceso de privatización de la industria, se hayan consumido de forma más ineficiente los combustibles.

La Tabla 4.9 muestra los valores del consumo por unidad de producto para cada fuente de energía. El diesel y el combustóleo tienen una caída significativa, sin embargo su participación en el consumo de energía de la industria siderúrgica no es muy representativo y ha venido cayendo (7.3% en 1970 y 2.7% en 2006). Por su parte las emisiones específicas (por unidad de producto) del coque de carbón disminuyeron en 57%, las de la electricidad primaria en 51% y las del gas natural en 47%. Esta disminución puede explicarse por la desaparición de la tecnología de hogar abierto que utilizaba todos los combustibles, pero en particular el coque de petróleo de manera muy ineficiente, pero también al aumento en la eficiencia de producción del proceso DRI-BOF y del DRI-el arco eléctrico. Además, en el caso de las emisiones específicas de la electricidad primaria, la reducción también se debe a la caída del factor de emisión para producir electricidad.

Analizando el comportamiento del total de las emisiones específicas por periodo de tiempo a través de su tasa promedio anual, se tiene que entre 2000 y 2006 la tasa de disminución de este indicador fue la más alta (-4%), seguida por el periodo 1990-2000 (-3.6%), y en 1970-1980 (-0.8%); mientras que en el periodo 1980-1990, este indicador creció ligeramente (0.5%).

Tabla 4. 9. Emisiones por unidad de producto. Elaboración propia con base en información de Sener e INEGI.

	Coque carbón [ton]	Coque petróleo [ton]	Diesel [ton]	Combustóleo [ton]	Gas Natural [ton]	Electricidad primaria [ton]	Total [ton]
1970	1023.70	0.00	73.21	100.36	522.20	598.70	2318.17
1971	1075.62	0.00	73.20	100.36	522.19	590.79	2362.16
1972	1027.39	0.00	73.21	100.36	522.20	502.76	2225.92
1973	1098.84	0.00	73.20	100.35	522.20	600.86	2395.45
1974	1051.24	0.00	73.21	100.35	522.19	647.10	2394.10
1975	998.81	0.00	73.20	100.35	522.19	655.83	2350.38
1976	1074.94	0.00	73.20	100.34	522.20	651.67	2422.35
1977	1094.47	0.00	73.20	100.35	522.20	650.27	2440.48
1978	952.61	0.00	73.21	100.35	522.19	614.01	2262.37
1979	916.14	0.00	73.21	100.35	522.19	603.10	2214.99
1980	831.30	0.00	73.20	100.35	522.19	613.84	2140.88
1981	826.49	0.00	73.21	100.35	522.20	585.92	2108.17
1982	850.68	0.00	73.21	100.36	522.22	598.79	2145.26
1983	846.64	0.00	73.21	100.35	522.19	601.49	2143.88
1984	785.82	0.00	73.19	100.34	522.13	614.60	2096.07
1985	811.86	0.00	73.21	100.35	522.19	615.61	2123.22
1986	785.63	0.00	73.20	100.35	522.19	523.48	2004.85
1987	813.06	0.00	71.12	101.75	551.78	548.39	2086.10
1988	777.89	0.00	15.16	244.03	687.88	922.94	2647.89
1989	752.41	0.00	18.78	262.85	532.47	1022.54	2589.04
1990	602.69	0.00	6.55	234.89	513.63	901.42	2259.19
1991	595.55	0.00	6.27	240.57	547.00	785.59	2174.98
1992	644.24	0.00	7.63	128.26	506.03	742.56	2028.72
1993	596.60	0.00	6.95	145.61	435.47	531.58	1716.21
1994	596.60	0.00	6.97	145.61	407.41	536.73	1693.31
1995	576.05	0.00	7.15	127.67	362.42	526.70	1599.99
1996	565.03	0.00	6.94	137.09	440.10	518.89	1668.06
1997	562.81	0.00	6.62	130.78	468.97	473.00	1642.18
1998	564.04	0.00	6.63	131.07	458.24	452.18	1612.17
1999	529.40	0.00	6.16	105.74	464.70	449.39	1555.39
2000	425.76	32.67	4.89	82.16	556.54	454.14	1556.16
2001	482.82	16.03	4.56	76.75	491.69	422.53	1494.38
2002	504.20	21.80	3.79	58.34	434.58	346.36	1369.06
2003	443.11	0.00	3.56	54.88	422.44	318.98	1242.97
2004	417.13	0.00	3.46	53.19	408.34	286.58	1168.70
2005	439.05	0.00	3.58	55.17	423.56	305.10	1226.47
2006	439.47	35.34	4.59	30.87	420.29	290.54	1221.10

En el periodo 1970-1980, la disminución de las emisiones específicas sólo ocurrió en el caso del coque de carbón, lo cual impactó en el total. Sin embargo entre 1980-1990, el incremento fue producto del aumento en las emisiones específicas de la electricidad y el combustóleo. Entre 1990 y 2000, las emisiones específicas de todos los combustibles y de electricidad sufrieron un reducción con excepción del gas natural y finalmente entre 2000 y 2006 las emisiones específicas del diesel, combustóleo, gas natural y electricidad primaria disminuyeron y aumentaron las del coque de petróleo y el coque de carbón (Tabla 4.10).

Tabla 4. 10. Tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones de GEI por unidad de producto (Ton CO₂eq./Mton). Elaboración propia con base en información de Sener e INEGI.

	1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
Coque carbón	-2.3%	-2.1%	-3.2%	-3.4%	0.5%
Coque petróleo					1.3%
Diesel	-7.4%	0.0%	-21.4%	-2.9%	-1.0%
Combustóleo	-3.2%	0.0%	8.9%	-10.0%	-15.1%
Gas Natural	-0.6%	0.0%	-0.2%	0.8%	-4.6%
Electricidad primaria	-2.0%	0.3%	3.9%	-6.6%	-7.2%
Total	-1.8%	-0.8%	0.5%	-3.7%	-4.0%

La explicación del comportamiento de tanto del consumo específico de energía, como de las emisiones específicas se presenta en el capítulo de resultados a través de la metodología que se presenta en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5.

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LOS CAMBIOS EN EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LAS EMISIONES

En el presente capítulo se expone la metodología denominada de índices de cambio que permite evaluar los cambios en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂, de acuerdo con la actividad, la estructura, la eficiencia y las fuentes de energía. Para ello el estudio se basa en artículos internacionales que permiten encontrar los valores de las mejores prácticas a nivel mundial, así como la metodología del índice denominado Divisia.

5.1 Metodología

En los capítulos anteriores, se presentó el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria siderúrgica nacional. Como se describió, el consumo y las emisiones crecieron de forma importante, pero el consumo específico se redujo.

Interesa saber cuáles fueron los factores que influyeron en estos cambios en el consumo de energía y en las emisiones. Asimismo, qué tan lejos está la industria siderúrgica nacional de la eficiencia de otros países.

Para ello, en el presente capítulo se presenta la metodología de índices de cambio que es una técnica que permite descomponer el consumo de energía y las emisiones en los factores de actividad, intensidad o consumo específico, estructura y cambio en el consumo de combustible. Para ello se describirá brevemente la metodología utilizada en este trabajo que incluye el método de comparaciones internacionales de las mejores prácticas y posteriormente en índice Divisia como método para calcular los cambios.

En general se puede establecer que el consumo de energía puede explicarse por tres efectos. El de la actividad, la estructura y la intensidad energética. Como en este caso se utilizaron unidades físicas, entonces la actividad se refiere a la producción de acero crudo, la estructura se refiere a los cambios en la estructura de producción del acero (cambios tecnológicos) y la intensidad se refiere al consumo específico, es decir, el consumo de energía por unidad de producción.

De esta forma:

$$E_t = \sum_i A_{ti} S_{ti} CE_{ti} \quad (5.1)$$

Donde:

E_t = Consumo de energía en el año t

A_t = Producción de acero por el proceso i en el año t

S_{ti} = Porcentaje del proceso t en relación a la producción total de acero

CE_{ti} = Consumo específico del proceso i en el año t

Los procesos se refieren a las rutas tecnológicas. Por ejemplo una ruta es: Alto horno-convertidor básico de oxígeno - colada en lingotes. Otro proceso o ruta tecnológica puede ser: chatarra - arco eléctrico - colada continua. Otra puede ser: Reducción directa-arco eléctrico - colada continua. Obviamente cada ruta implica un consumo de energía diferente. El más eficiente es el chatarra-arco-eléctrico, debido a que no se utiliza energía en la fundición del hierro. La colada continua utiliza menor energía que la colada en lingotes.

Desafortunadamente, no se cuenta con suficiente información para poder estimar el consumo específico de cada proceso de la industria siderúrgica mexicana. Por ello, se utiliza la metodología conocida como mejores prácticas internacionales desarrollada por Worrel et al. (1997).

De acuerdo con esta metodología se utiliza el índice de producción física (PPI por sus siglas en inglés) para cada año t , calculado como:

$$PPI_t = \sum_n (P_{it} SEC_{BPit}) \quad (5.2)$$

Donde P_{it} es la producción de cada proceso i en el año t , y SEC_{BPit} es el consumo específico de combustible (por sus siglas en inglés *specific energy consumption*) de la mejor práctica de cada proceso a nivel internacional. Los procesos son: BF-BOF (alto horno-convertidor al oxígeno-por sus siglas en inglés), DRI-EAF (reducción directa-arco eléctrico) y chatarra-EAF (chatarra-arco eléctrico) así como colada en lingotes y continua y laminación en frío y en caliente. La suma entonces es sobre el número n de rutas o procesos.

Los valores del SEC de la mejor práctica se obtienen de la publicación más reciente del Lawrence Berkeley National Laboratory (Worrel et al., 2008). Ésta se muestra en la Tabla 5.1.

Según esta metodología, desarrollada también por Ozawa et al (2002) para la industria siderúrgica nacional, la SEC está influenciada por el proceso y la combinación de productos. Así, el consumo total de energía para cada año, teniendo en cuenta el PPI, esta dado por:

$$E_t = \sum_n P_t (PPI_t / \sum P_t) * (\sum E_t / PPI_t) \quad (5.3)$$

Donde la sumatoria de los diferentes productos ΣP es el parámetro de la actividad; $PPI/\Sigma P$ es el parámetro de estructura y $\Sigma E/PPI$ es el parámetro de la eficiencia energética de los procesos de producción. Esto, para cada año.

Tabla 5. 1. Consumo específico de la mejor práctica para diferentes procesos presentado en Worrell et al., 2008.

Processes	Mejor práctica SEC (combustible) ^a (GJ/t)	Mejor práctica SEC (electricidad) ^b (GJ/t)	Mejor práctica SEC (primaria) ^c (GJ/t)
BF	14.57	0.34	15.66
DRI	15.14	-0.97	12.18
BOF	-0.55	0.23	0.10
EAF	0.81	1.55	5.50
Colada continua	0.03	0.03	0.11
Laminación en caliente (barras)	2.91	0.56	4.60
Laminación en caliente (alambón)	1.68	0.40	2.88
Laminación en frío	0.14	0.26	0.94

a Consumo de energía que incluye uso de los gases de desecho e inyección de oxígeno.

b. La mejor práctica en la reducción directa incluye cogeneración

c. Eficiencia de 33%.

BF: Alto horno; DRI: Reducción directa; BOF: horno básico de oxígeno; EAF: Arco eléctrico.

Similar al uso de la energía, las emisiones de CO₂, usando PPI, se puede expresar como:

$$CO_{2t} = \sum_n P_t (PPI_t / \Sigma P_t) * (\Sigma E_t / PPI_t) * [\Sigma CEF_j (E_{jt} / E_t)] \quad (5.4)$$

Donde además de los componentes de energía presentados en la ecuación (5.3), se incorpora el componente $\Sigma CEF_{jt} (E_{jt} / E_t)$, este se refiere al factor de emisión (CEF) que multiplica el porcentaje del combustible j en el año t respecto al consumo de energía primaria e indica cómo influye la estructura del consumo por combustibles en las emisiones.

Esta misma ecuación puede calcularse para los otros gases de efecto invernadero.

Por otro lado, interesa saber qué tanto peso tuvo cada efecto en los cambios en el consumo de energía y las emisiones entre 1970 y 2006. Para ello, se utiliza la metodología de los índices de cambio.

El análisis de descomposición de índices es un área de estudio que ha ganado importancia en los últimos 25 años como herramienta de apoyo en la política energética y medioambiental. Se ha utilizado esta metodología para explicar el comportamiento de la demanda de energía cuantificando la contribución relativa de los impactos derivados del

cambio estructural y la intensidad energética. Las ventajas de este procedimiento son su simplicidad y flexibilidad, al usar como base teórica la teoría de los números índices (Marrero y Ramos-Real, 2008).

Se parte de la definición de una función de comportamiento que especifica una variable de carácter agregado y que ha de descomponerse en función de un número de elementos predefinidos. A partir de esta función de comportamiento, se utilizan diferentes métodos para cuantificar los impactos de variaciones en estos componentes sobre el agregado total. La forma concreta en que se realizan dichas descomposiciones dependen de la teoría específica que se utilice (Laspeyres, Paasche, Divisia, etc.).

Los dos procedimientos más utilizados para realizar la descomposición son el de Laspeyres y el de Divisia. El índice de Laspeyres mide el porcentaje de cambio en el tiempo de un conjunto de elementos utilizando como ponderadores los valores de un año base. El índice de Divisia es una suma ponderada de tasas de crecimiento logarítmicos, donde los ponderadores son los porcentajes de participación de cada componente. En términos elementales, los métodos basados en el índice de Laspeyres se basan en el concepto familiar de porcentajes de variación mientras que los basados en el índice de Divisia se sustentan en variaciones logarítmicas. Törnqvist et al (1985) utilizó por primera vez la tasa de cambio logarítmico y señaló que era un indicador simétrico y aditivo mientras que los porcentajes ordinarios no cumplían con estas propiedades (Marrero y Ramos-Real, 2008).

En los años 80 se utilizó ampliamente el índice de Laspeyres mientras que los índices de Divisia comenzaron a ganar terreno en los años 90. En los últimos años numerosos estudios utilizaban los dos métodos y comparaban los resultados. Desde el punto de vista teórico, los índices de Laspeyres, aunque son más fáciles de entender desde el punto de vista intuitivo, presentan algunos defectos entre los cuales destaca que queda un residuo por explicar fruto de la interacción entre los factores explicativos. En algunos casos, estos residuos podían ser varias veces superiores que la cantidad explicada de la variable agregada analizada.

Por su parte, los índices de Divisia presentan una serie de ventajas ya que el peso de cada factor puede cambiar en el tiempo así como obtener una descomposición aditiva de la tasa de crecimiento de cada factor. Sin embargo, tienen el inconveniente de que existirán tantos índices como métodos de ponderación se utilicen para las tasas de crecimiento cuando se tienen datos discretos en diferentes momentos del tiempo. Ang y Choi (1997) propusieron una versión refinada del método de Divisia que solventaba el problema de los residuos y, de esta forma, suponía una descomposición perfecta de los efectos (Log Mean Divisia Index, LMDII.) La solución se basa en la definición de los ponderadores a través del uso de la media logarítmica de los pesos (los "shares"). Los resultados pueden presentarse a partir de una descomposición aditiva o multiplicativa que se relacionan entre ellas a través de una fórmula sencilla, por lo cual son equivalentes (Marrero y Ramos-Real, 2008).

Este método ha sido empleado mayoritariamente a partir del año 2000 en numerosos estudios. Ang (2000) presenta un sumario de los diferentes métodos utilizados por investigadores y algunas agencias nacionales y organismos internacionales de la energía. La conclusión de este estudio es que LMDI es el método más recomendable, en su forma aditiva y multiplicativa, tanto por sus propiedades teóricas como por su facilidad para su uso y en la interpretación de los resultados.

El índice Divisia fue introducido precisamente por Divisia (1973). Si se deriva el logaritmo de la energía respecto al tiempo (es decir, el teorema del crecimiento instantáneo) se obtiene:

$$\frac{d \ln(E_t)}{dt} = \sum w_i [(d \ln(A_{it}) / dt) + (d \ln(S_{it}) / dt) + (d \ln(E_{fit}) / dt)] \quad (5.5)$$

Donde $W_i = E_{it}/E_t$ es la proporción del sector i en el consumo de energía. En este caso como sólo se trabaja con el consumo de energía de la industria siderúrgica $w = 1$.

Integrando desde el tiempo 0 al tiempo T (en este caso, año inicial y año final), la ecuación queda como:

$$E_t = \int_0^T \sum (d \ln(A_{it}) / dt) + \int_0^T \sum (d \ln(S_{it}) / dt) + \int_0^T \sum (d \ln(E_{fit}) / dt) \quad (5.6)$$

Aplicando la exponencial, puede ser aplicado en forma de multiplicación como el cambio "D" en la energía $D_{tot} = D_{actividad} * D_{estructura} * D_{eficiencia}$; o en su forma aditiva $E_t - E_0 = \Delta Act + \Delta Estr + \Delta Eeff$

$$D_{act} = \int_0^T d \ln(A_{it}) dt \quad (5.7)$$

$$D_{str} = \int_0^T d \ln(S_{it}) dt \quad (5.8)$$

$$D_{SEC} = \int_0^T d \ln(E_{fit}) dt \quad (5.9)$$

Como los datos son discretos entonces se aplica un promedio al logaritmo, de tal forma que como el promedio de un número logarítmico es $L(x,y) = (y-x) / \ln(y/x)$ y recordando la ecuación (5.3):

$$\Delta Act = \sum L(E_T, E_0) \ln(P_T/P_0);$$

$$\Delta Estr = \sum L(E_T, E_0) \ln[(PPI_T/\sum P_T)/(PPI_0/\sum P_0)]$$

$$\Delta Eeff = \sum L(E_T, E_0) \ln[(\sum E_T/PPI_T)/(\sum E_0/PPI_0)]$$

Para el CO_2 ,

$$\Delta Act = \sum L(CO_{2ET}, CO_{2E0}) \ln(P_T/P_0);$$

$$\Delta Estr = \sum L(CO_{2ET}, CO_{2E0}) \ln[(PPI_T/\sum P_T)/(PPI_0/\sum P_0)]$$

$$\Delta Eeff = \sum L(CO_{2ET}, CO_{2E0}) \ln[(\sum E_T/PPI_T)/(\sum E_0/PPI_0)]$$

$$\Delta Fuel = \sum L(CO_{2ET}, CO_{2E0}) \ln[\sum CEF_j(E_{jT}/E_T) / \sum CEF_j(E_{j0}/E_0)]$$

La aplicación de esta metodología puede interpretarse de la siguiente forma. El cambio en la actividad ΔAct dirá como hubiese cambiado el consumo de energía o las

emisiones si la estructura de la producción, la eficiencia y la estructura de los combustibles se hubiera mantenido constante en su valor de 1970 y sólo hubiera variado la producción.

Por su parte el efecto estructura ΔE_{Str} dirá cómo hubiese variado el consumo de energía si sólo hubiese cambiado la estructura de los procesos de producción y los demás factores se hubiesen mantenido constantes. Y así sucesivamente con las demás variables.

El índice Log Mean Divisia descompone perfectamente en las variables establecidas, de tal manera que no hay residuos que interpretar.

CAPÍTULO 6.

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los principales resultados de aplicar la metodología expuesta en el capítulo anterior. De esta forma se presentan los cambios en la actividad (producción); estructura (cambios en las tecnologías de producción) y eficiencia (disminución del consumo de energía por unidad de producto respecto a las mejores prácticas internacionales) para todo el periodo de estudio, así como para cada década. Asimismo, en el caso de los cambios que ocurrieron en las emisiones de CO₂ equivalente, se incluye el cambio producido por la sustitución de combustibles.

6.1 Resultados para energía

La Tabla 6.1 muestra los resultados de la aplicación de la metodología presentada en el capítulo anterior. De acuerdo con el análisis de descomposición, el sustancial crecimiento en la producción de acero (Actividad) fue el principal factor que impulsó el enorme aumento del consumo de energía. Este efecto de la actividad muestra que el consumo de energía primaria hubiese llegado a 397,52 PJ (hubiese crecido en 227% en lugar del 133% de aumento real) si la estructura y la eficiencia energética se hubieran mantenido constantes en los niveles de 1970.

El efecto de la estructura muestra que si los valores de la producción y la eficiencia energética se hubieran mantenido constantes a lo que tuvieron en 1970, los cambios en el proceso y la combinación de productos (estructura) implicaría un consumo de energía de 115.96 PJ en 2006 (consumo de energía 5% menor que el de 1970). Del mismo modo, los cambios en la eficiencia energética son tan importantes que hubiesen reducido el consumo de energía primaria tan sólo 12.72 PJ en 2006 (90% menos que en 1970) si el volumen de producción y la estructura se hubieran mantenido constantes.

Tabla 6. 1. Cambio en el consumo de energía primaria de la industria siderúrgica mexicana. Elaboración propia.

1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

PJ					
Cambios reales	161.36	86.73	61.06	76.29	-62.71
Actividad	275.90	98.57	47.34	178.08	15.94
Estructura	-5.65	18.18	-9.77	-5.70	-25.90
Eficiencia	-108.89	-30.02	23.49	-96.09	-52.75
%					
Cambios actuales	133.0%	71.5%	29.3%	28.3%	-18.1%
Actividad	227.5%	81.3%	22.7%	66.1%	4.6%
Estructura	-4.7%	15.0%	-4.7%	-2.1%	-7.5%
Eficiencia	-89.8%	-24.8%	11.3%	-35.7%	-15.3%

El signo negativos en algunos de los resultados de la tabla, muestran reducciones en la cantidad de energía utilizada, como se puede ver, el aumento en la eficiencia es lo que realmente ayudó a tener los valores de consumo específico de energía que se tienen actualmente, ya que la aportación de la estructura no es tan significativa como para reducir de manera considerable al consumo de energía. Esto muestra que las elecciones que se tomaron al utilizar en mayor proporción al BOF y al horno de arco eléctrico, que tienen eficiencias energéticas más altas, fueron acertadas, aunado a la modernización de las plantas productoras y de innovaciones en las diferentes etapas de producción.

Analizando los mismos efectos por período, se tiene que la actividad aumentó el consumo de energía primaria en todos los períodos, con excepción del periodo 2000-2006, donde se puede observar que este efecto disminuyó considerablemente. En cuanto a la estructura, se tuvo sólo un aumento en el período de 1970 a 1980, llevando al consumo de energía primaria hacia abajo con mayor fuerza en el período de 2000 a 2006. Por su parte, la eficiencia fue quien llevó más abajo al consumo de energía primaria, con la excepción del período 1980 a 1990.

El principal factor que hizo disminuir el consumo de energía primaria en todo el período de 1970 a 2006, fue la eficiencia energética. Las razones de esta disminución son, principalmente, el cierre de horno de hogar abierto en 1992, y el aumento del uso de DRI-EAF y Chatarra-EAF, también, el aumento de la utilización de colada la continúa. En términos de cambios estructurales, se debe principalmente a la reducción de la producción de acero laminados en frío y al aumento de hojas delgadas y ultra-finas laminadas en caliente.

Por otro lado, la Figura 6.1 muestra la evolución real del SECp y su comparación con el SECp de las mejores prácticas internacionales, de acuerdo con el LBNL (299). Como puede observarse, la disminución del SECp es tan importante que casi llega al de las mejores prácticas en 2006 (17,2 a 14,92 GJ_p / tcs).

Este aumento se debe a un gran desarrollo de los procesos que actualmente se usan en el país para la producción siderúrgica, esto no solo se atribuye a la implementación de tecnología extranjera, sino al gran avance que México ha tenido con su tecnología propia, como lo es la tecnología para obtener hierro por reducción directa, tal es el caso del proceso credo por HYLSA, el proceso de reducción directa HyL.

También se ha mejorado en la implementación de tecnología que ayuda a reducir el consumo de energía, como lo es el aumento en el uso de los gases de escape de que desprenden los hornos, utilizados ya sea para la producción de energía eléctrica o para algún proceso secundario en el proceso de fabricación siderúrgico.

El estar tan cerca del SECbp, ayuda a México a tener competitividad mundial y a ser más atractivo el que algunas empresas extranjeras y que los inversionistas volteen a ver que en el país se tiene la capacidad suficiente de desarrollar los procesos a la par de cualquier país. Además, se reduce las emisiones de CO₂ asociadas a la producción del hierro y el acero, siendo esto un gran avance, ya que la industria siderúrgica nacional contribuye en gran medida a la contaminación ambiental.

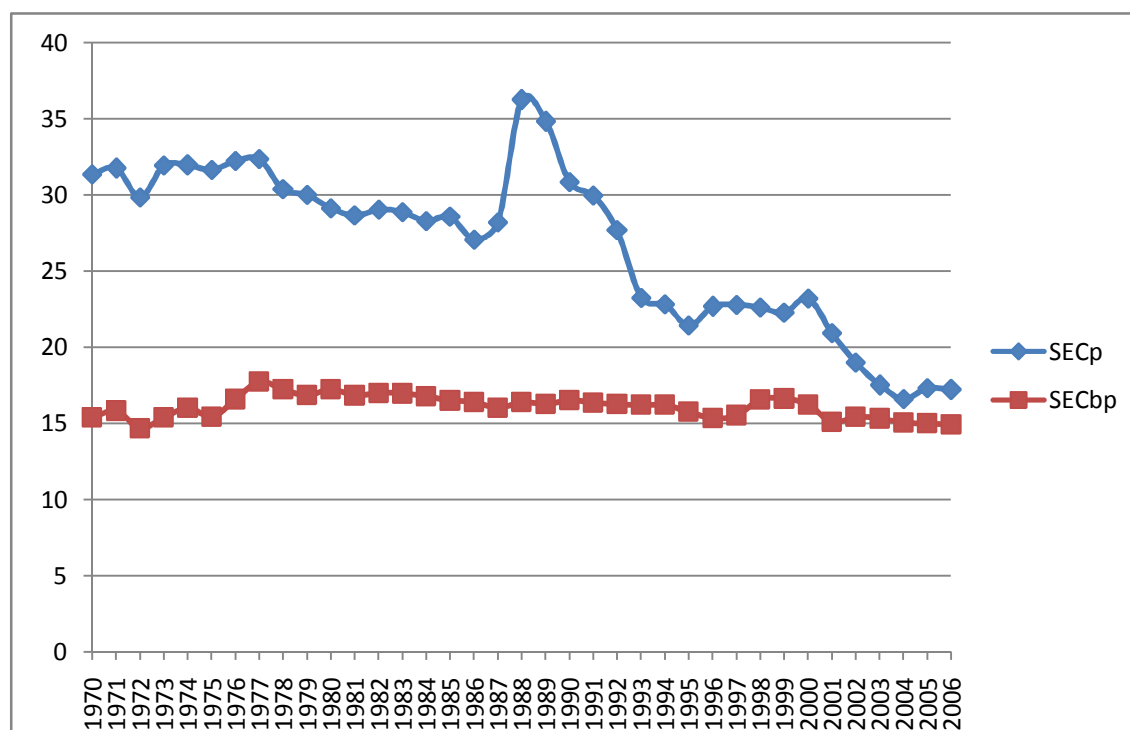


Figura 6. 1. Comparación entre el SECp y el SECbp. Elaboración propia con base en datos de Balance de Energía (Sener, 1997 y 2008).

6.2 Resultados para emisiones

Las emisiones de CO₂ no sólo se determinan por los cambios en la actividad, estructura y en la eficiencia energética, sino también por la mezcla final de combustibles en la industria siderúrgica y en la generación de energía eléctrica. Como se ha mencionado anteriormente, desde 1970 a 2006, la combinación de fuentes de energía utilizada en la industria mexicana del hierro y el acero tuvo diversos cambios. El uso de combustibles más bajos de carbono como el gas natural aumentó debido al crecimiento en la producción por DRI, mientras que el consumo de electricidad aumentó considerablemente debido al aumento en la producción de EAF. La Tabla 6.2 muestra los cambios de CO₂ para 1970-2006 y por cada período. El efecto de la estructura de los combustibles hizo disminuir las emisiones, con la excepción del período 2000-2006, debido al aumento en el uso del coque de petróleo y coque de carbón.

Tabla 6. 2. Cambio en emisiones de CO₂ de la industria siderúrgica mexicana. Elaboración propia.

	1970-2006	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2006
TgCO ₂					
Cambio en emisiones totales	17,98	9,46	5,26	8,47	-5,21
Cambio en la actividad	19,87	7,24	3,46	12,73	1,12
Cambio en la estructura	-0,41	1,34	-0,71	-0,41	-1,82
Cambio en la eficiencia	-7,84	-2,21	1,72	-6,87	-3,72
Estructura de combustibles	-0,57	-0,07	-0,07	-0,87	0,18
%					
Cambio en emisiones totales	133,60%	70,30%	22,90%	30,10%	-14,20%
Cambio en la actividad	147,70%	53,80%	15,10%	45,20%	3,10%
Cambio en la estructura	-3,00%	9,90%	-3,10%	-1,40%	-5,00%
Cambio en la eficiencia	-58,30%	-16,40%	7,50%	-24,40%	-10,10%
Estructura de combustibles	-4,20%	-0,50%	-0,30%	-3,10%	0,50%

México es un país que se ha comprometido internacionalmente a reducir emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo con sus propias prioridades de desarrollo. Sin embargo, en muchos de los sectores de consumo de energía se han desarrollado muy pocos esfuerzos para mejorar la intensidad energética, es decir, el consumo de energía por unidad de producto. Un ejemplo exitoso en el país es la industria siderúrgica, pues la eficiencia en el consumo de energía y con ello, las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producción se han reducido significativamente, mostrando que la modernización tecnológica es viable para la industria nacional.

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES

Este trabajo analiza las tendencias del consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero de la industria siderúrgica nacional de 1970 hasta 2006.

Durante este periodo, muchas transformaciones ocurrieron en la industria siderúrgica mexicana, ya que se pasó de ser una industria paraestatal a una industria privada, además de un proceso de apertura al comercio exterior. Los cambios también se asocian a la entrada del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y el comportamiento de nuestro principal socio comercial, que es el mercado estadounidense.

Por otro lado, el año de 1970 es el detonante mundial para el aumento en la eficiencia energética de diversos sectores, siendo la incertidumbre de los países desarrollados y dependientes de las importaciones petroleras, quienes tienen mayor preocupación de un abastecimiento seguro en cuanto a cantidad, calidad y precio, fue éste hecho lo que desencadenó que el mundo industrializado pusiera una atención primordial al ahorro, el uso racional y la eficiencia energética en el diseño y las metas que establecerían en sus sistemas energéticos.

Surgieron después, otras alertas relativas al cambio climático y sus consecuencias para la humanidad que acentuaron la preocupación por las modalidades de uso de la energía, los residuos producidos, sus emisiones a la atmósfera y la elevación de la temperatura por el efecto invernadero. A través de un proceso lento de toma de conciencia a nivel mundial y la firma de tratados y protocolos para la preservación del medio ambiente, (con las resistencias conocidas de parte del mundo industrializado), se creó un nuevo impulso para la búsqueda de un mejor uso de la energía; procurando el empleo de menos insumos para el mismo producto e incentivando modificaciones tecnológicas o cambios directos en el consumo de energía.

El análisis de las tendencias del consumo de energía y de las emisiones asociadas de CO₂ permite entender cuáles son los factores que provocan el cambio en las tendencias, y permite sugerir políticas energéticas que promueven la disminución tanto del consumo de energía, como de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es para este análisis que ayudan las metodologías de índices de cambio y la metodología de comparaciones internacionales.

Como se mencionó previamente, la industria nacional siderúrgica tenía una componente estatal muy importante hasta antes de los noventa y en 1992 se privatiza. A partir de entonces, la industria integrada se ha ido vinculando a la industria siderúrgica internacional con la adquisición por parte de capitales extranjeros de diversas empresas, y

han venido surgiendo diversas acereras más pequeñas. En este proceso se generó un cambio tecnológico muy importante que promovió un uso más eficiente de la energía.

Los principales cambios tecnológicos que ayudaron a mejorar la eficiencia energética de la industria siderúrgica son los siguientes:

- En la producción de hierro, la recuperación y aprovechamiento de los gases de salida del alto horno y de los hornos productores de coque, para cogeneración, o para precalentamiento del aire necesario para los procesos de fabricación.
- Aumento de la producción de hierro por reducción directa. Esto incluye el desarrollo de tecnología propia, como es el caso de la tecnología que generó HYLSA con sus diferentes procesos de HYL, que está colocada entre las mejores y más eficientes a nivel internacional.
- En la producción de acero, la completa sustitución del horno de hogar abierto por el horno básico de oxígeno y el arco eléctrico.
- En la producción secundaria, el aumento de la colada continua que sustituyó casi por completo a la colada en lingotes.
- Aumentado la producción de laminados en caliente.
- Ligeramente aumentó el uso de la chatarra como materia prima en los hornos de arco eléctrico.

En general la producción de acero de México en el periodo 1970-2006, creció a una tasa anual del 4.1%, lo que generó un aumento anual del 2.4% en el consumo de energía primaria y de 2.3% en emisiones de CO₂ equivalente, asociadas al consumo de energía. En el mismo período, el consumo específico de energía primaria (medido como energía primaria por acero producido) se redujo de 31.3 GJp/T en 1970 a 17.20 en 2006, y las emisiones específicas de 2.31×10^3 a 1.22×10^3 CO₂/T.

Para entender las razones de los cambios en el consumo de energía y emisiones se utiliza una metodología de descomposición, basada en el análisis de estructura/eficiencia por comparación internacional y el índice Log Mean Divisia (Ang et al, 2000)

Este análisis muestra que por el efecto de la actividad, que explica en cuanto hubiera cambiado la energía, si la estructura de producción y la eficiencia energética se hubieran mantenido constantes a su valor de 1970, el consumo de energía primaria hubiese aumentado entre 1970 y 2006, en 227% en lugar de 133%, como realmente ocurrió.

Por su parte, el efecto estructural, que explica que hubiese pasado si la producción y la eficiencia se hubiesen mantenido constantes a su valor de 1970, y sólo hubiera cambiado la estructura de producción, hubiese reducido el consumo de energía en un 4.7%, en vez del 133%.

Si se hubiese mantenido constante la producción y la estructura, entonces el consumo de energía entre 1970 y 2006 por efecto de la eficiencia energética, se hubiera reducido en 90%.

Por su parte, el análisis de descomposición de las emisiones de CO₂ muestra que el efecto de la actividad elevaría en un 147.7% el valor de las emisiones de CO₂ en lugar del

umento del 133.6% que se tiene en todo el periodo. Por su parte el efecto de la estructura, muestra una disminución de las emisiones de CO₂ en 3%, el efecto de la eficiencia es quien hace que el valor de las emisiones de CO₂ estén en el valor que se tiene, al tener una participación a la baja de 58.3%, y el efecto de la estructura de los combustibles, que ayuda a disminuir las emisiones de CO₂ con un aporte negativo de 4.2%.

Este último efecto es negativo porque el gas, que tiene menor contenido de carbono aumentó, mientras el coque de carbón (con un contenido de carbono mayor) aumentó. Sin embargo, esta disminución podría haber sido mayor si no fuera porque en los últimos años aumentó el factor de emisión de la electricidad y también el uso de coque de petróleo.

Aunque en México el uso de hierro esponja, producido por la tecnología de hierro de reducción directa, es el que provee en su mayoría a las plantas de hierro de reducción directa, al no contar con un suficiente abastecimiento de chatarra.

De acuerdo con los avances que se han dado en la industria siderúrgica mexicana, el potencial técnico de mejoramiento de la eficiencia energética se ha ido reduciendo con respecto a las tecnologías de la "mejor práctica".

Para que la siderurgia mexicana aumentara aun más su eficiencia energética, se requeriría un mayor uso de la chatarra como materia prima.

Por parte de los productos, se puede empezar a manufacturar productos que tengan un mayor valor agregado, como lo son los aceros especiales, sin dejar de lado los productos que se fabrican hasta ahora. Ésta tendencia se puede observar en los países desarrollados, que ya no necesitan tanta producción de aceros básicos, como lo son varillas, tubos, etc., y que están poniendo más atención a la fabricación de aceros especiales, ya que estos en su procesamiento son menos contaminantes y dejan mayores ganancias, además de que si se sigue con la producción actual de acero se tiene mayor riesgo de entrar en problemas de sobreproducción y llegar a las prácticas "dumping", que es la importación de productos a un precio menor de lo que cuesta producirlos en el país, haciendo una competencia desleal y que pocos beneficios deja al país.

El aumento en la eficiencia de la industria siderúrgica se puede entender por el hecho de que México se abrió a la competitividad del mundo en todas sus ramas, que si bien es cierto que no se tiene la capacidad de competencia en todos los ramos con las grandes potencias, la apertura económica, en el caso de la industria siderúrgica, ha ayudado a que se tenga que ver hacia nuevos horizontes y se tenga que ajustar el mercado nacional a los estándares y a las exigencias internacionales de un mercado mundial en constante cambio y de una globalización cada vez mayor. Aunado al auge de países como India y China que cada día aumentan su producción y la lanzan al mercado internacional a precios que desplazan a los productos nacionales. En otros casos, la apertura comercial no tuvo efectos positivos.

Un gran aporte a la mejora significativa que se dio a la industria siderúrgica nacional se debió a la privatización. Si bien es cierto que durante el mandato que tuvo el gobierno al frente de la siderúrgica nacional se contaba con mano de obra calificada y con una infraestructura pensada en su totalidad a poder contar con una industria capaz de

competir a nivel internacional, fue solo durante los primeros años que se tuvo tanto el apoyo económico como político del gobierno para lograr los grandes objetivos trazados al principio del gran proyecto que fue la siderúrgica paraestatal, ya que como es común en el país, durante los años posteriores a la inauguración del proyecto, se vieron reducidos el interés así como los fondos que respaldaran todo lo que se prometió en un principio.

Aunque los efectos que tuvo la privatización en cuanto a la planta de personal se refiere no fueron del todo benéficos para los trabajadores, ya que el poder sindical fue perdiendo peso en las decisiones de la empresa, tanto para producción así como en la implementación de las nuevas tecnologías que reducen el número de empleados necesarios para manejar algún equipo. Al incrementarse los avances en los procesos de producción, se empezó a prescindir de la mano de obra, dejando a muchos trabajadores sin empleo, además de que durante el control de la industria privada se dio paso a nuevas formas de contratación poco favorecedoras a los trabajadores.

También es importante decir que algunas de las empresas privadas transnacionales no aportan mucho a la riqueza del país, ya que solo ocupan la mano de obra barata que ofrece México, al exportar toda su producción, ocupando la infraestructura paraestatal que consiguieron a un precio muy por debajo de su valor real y sacando el mineral de las minas nacionales, sin que se refleje un beneficio a la sociedad así como a los trabajadores.

A manera de conclusión final y tomando en cuenta el nivel de la producción siderúrgica antes y después de la privatización, se puede observar que a partir de éste hecho se incrementó la producción, se redujo el consumo específico de energía, también disminuyeron las emisiones por unidad de producto producido. Es decir hubo un aumento significativo en la eficiencia energética producto de la modernización tecnológica. Teniendo de conclusión que para esta industria se tuvo una mejora, a partir de la privatización. Para poder evaluar de forma global los efectos de la privatización, es importante que estudios de tipo económico o laboral analicen los impactos en el empleo y las condiciones de trabajo.

REFERENCIAS.

Ang, B.W., Zhang, F.Q. 2000. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy* 25(12): 1149–1176.

Balance Nacional de Energía. 1996. Secretaria de Energía, México, D.F. 1997.

Balance Nacional de Energía. 2007. Secretaria de Energía, 2008, México, D.F. 2008.

Cámara Nacional de la Industria del Hierro del Acero (CANACERO). 2007. Perfil de la Industria Siderúrgica en México. México DF.

CANACERO. 2008. Subgerencia de Análisis Estadístico e Información. Disponible en www.canacero.com.mx

Corrales, S. 2007. Alianzas, fusiones y adquisiciones de la industria siderúrgica. *Economía y Sociedad* XII(20): 93-107. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

Craddock, P. 1995. *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh University Press. Citado por Ozawa, et. al, 2002.

De Beer, J.G. 1998. Potential for industrial energy-efficiency improvement in the long term. PhD Dissertation, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands Citado por Ozawa, et. al, 2002.

Déniz, F. 2007. La economía global y la industria siderúrgica. *Boletín de estudios económicos* LXII(192): 445-454. Disponible en <http://circuloempresariosvascos.files.wordpress.com/2008/05/05-deniz.pdf>

Enciclopedia Microsoft Encarta Online 2008 "Siderurgia," <http://es.encarta.msn.com> 1997-2008 Microsoft Corporation.

Guzmán, A. 2002. Las fuentes del crecimiento en la siderurgia mexicana. Innovación, productividad y competitividad. Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa - Porrúa, México D.F.

Hernández, A., García, A., Mertens, L. 2000. Trayectoria de modernización y calificación en la industria siderúrgica. Perspectivas para el siglo XXI. Estudio de caso de una planta en México. *Oficina Internacional del Trabajo Ginebra* SAP 2.61/WP.111. Disponible en <http://www.ilo.org/public/english/dialogue/sector/papers/insider/index.htm>.

IEA, 2006. *Energy Technology Perspectives 2006: Scenarios and strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris. Disponible en http://www.iea.org/speech/2006/ramsay/etp_ieej.pdf

International Institute Steel Industry (IISI). 2008. Short Range Outlook for finished steel products. Bruselas, Bélgica. Disponible en <http://www.worldsteel.org>

IISI, 2005: World steel in figures, 2005: International Iron and Steel Institute (IISI), Brussels. Disponible en <http://www.worldsteel.org>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000 a 2008. La Industria Siderúrgica en México. Aguascalientes, México. Disponible en <http://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1996. Sistemas de Cuentas Nacionales de México, Cuenta de Bienes y Servicios, 1968–1995, vol. 2.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Cambio climático 2001: Mitigación. Parte de la contribución del Grupo de trabajo III al Tercer Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.

IPCC, 2002: Cambio climático y biodiversidad. Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II del IPCC. IPCC, Ginebra, Suiza. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.

IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Core Writing Team, Pachauri, R.K, Reisinger, A. y Equipo principal de redacción (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.

Jenkins, R., Mercado, A., 2008. "Ambiente e industria en México: tendencias, regulación y comportamiento empresarial"-1a ed.-México, D. F.: El colegio de México, Centro de Estudios Económicos.

Kim, Y., E. Worrell. 2002. International comparison of CO2 emissions trends in the iron and steel industry. *Energy Policy* 30: 827-838.

Laso, R. 2003. Breve Historia de la Siderurgia Integral Española. CEISI. Disponible en <http://www.minerometal.ccoo.es/%5Cficpdf%5C67Historia%20de%20la%20Siderurgia%20Integral%20Espa%C3%B1ola2.pdf>

López, C. 2001. "América Latina: panorama de la industria siderúrgica en la década de los noventa" en Rueda Peiro, Isabel y Nadima Simón Domínguez (coord.) *De la privatización a la crisis*, UNAM, México.

Marrero, G., Ramos-Real F. 2008. La intensidad energética en los sectores productivos en la UE-15 durante 1991 y 2005: ¿Es el caso español diferente? *Fundación de estudios de economía aplicada*. ISSN 1988-785X. Disponible en www.fedea.es

Masaitis, J. 2001. La industria del hierro y el acero. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Hierro 73. Disponible en <http://d.scribd.com/docs/2j7uyuy708n1f2w50jlm.pdf>.

Moncada, G. 2008. Industria: eficiencia energética. Disponible en <http://www.cnnexpansion.com/manufactura/tendencias/industria-eficiencia-energetica>

Nery, L. 2007. Los Acabados Superficiales. *Universidad de los Andes*. Venezuela. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/6585023/Los-Acabados-Superficiales>.

Ortiz-Prado, A. 2008 , Apuntes de clase, Modelado de Procesos de Manufactura, Cap. 2, F.I UNAM.

Ozawa L. 2000. Análisis del consumo de energía en el sector industrial mexicano y comparaciones internacionales: Industrias siderúrgica y cementera. Tesis de maestría en ingeniería energética, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Ozawa L., Sheinbaum C., Martin N., Worrell E., Price L. 2002. Energy use and CO2 emissions in Mexico's iron and steel industry. *Energy* 27: 225-239.

Perfil de la Industria Siderúrgica en México, Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO), Febrero 2007.

Ricketts, J. 2009. How a blast furnace works. Disponible en <http://www.steel.org/AM/Template.cfm?Section=Articles3&CONTENTID=25317&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm>

Rueda, 1994. Isabel Rueda Peiro, "El contexto mundial", en *Tras las huellas de la privatización. El caso de Altos Hornos de México*, UNAM-Siglo XXI, México, 1994.

Rueda, I y Simón, N. "Procesos Productivos y cambio técnico en Altos Hornos de México", en de la privatización a la crisis; El caso de Altos Hornos de México, Miguel Ángel Porrúa, México, 2001.

Rueda Peiro, Isabel (2001) "Evolución de la industria siderúrgica en el mundo en los años noventa" en Rueda Peiro, Isabel y Nadima simón Domínguez (coord.) *De la privatización a la crisis*, UNAM, México.

Secretaría de Energía, 2007. Prospectiva del sector eléctrico 2006-2015,

Secretaría de Energía, 2007. Balance Nacional de Energía.

Secretaría de Energía, 1997. Balance Nacional de Energía, 1970-1996.

Sheinbaum C, Rodríguez L. 1997. Recent trends in Mexican industrial energy use and their impact on carbon dioxide emissions. *Energy Policy* 25:825.

Sheinbaum C, Ozawa L. 1998. Energy use and CO2 emissions of Mexico's cement industry. *Energy* 23(9):725-32.

Simón, N. 1997. Evaluación Organizacional. El caso de Altos Hornos de México, S.A. después de la privatización, SICCO, México. pp. 120-128.

Solari, A. Martínez J. 2004, Cambios y reestructuración de la industria siderúrgica en América Latina y México, 1980-2000. *Aportes*, Revista de la Facultad de Economía, BUAP, Año IX, Número 26, Mayo-Agosto.

Soto L.A., 2003. El cambio mundial de la siderurgia Enfoques de comportamiento económico, tecnológico y comercial en las últimas décadas del siglo XX**Revista Contaduría y Administración*, No. 209, abril-junio 2003

Spoerl, J. S. A Brief History of Iron and Steel Production. Disponible en <http://www.anselm.edu/homepage/dbanach/h-carnegie-steel.htm>

Stubbles, J. 2009. The basic oxygen steelmaking (BOS) process. Disponible en <http://www.steel.org/AM/Template.cfm?Section=Articles3&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm&CONTENTID=12306>

Törnqvist, L., P. Vartia and Y. Vartia (1985), How should relative changes be measured? *The American Statistician*, 39 (1): 43-46

Vicente, P. 2009, Etimología de ACERO. Disponible en <http://etimologias.dechile.net>

World Steel Association, 2008a. Informe de Sustentabilidad de la Industria Siderúrgica Mundial 2008. Bruselas, Bélgica. Disponible en http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/Sustainability%20Report%202008_Spanish.pdf.

World Steel Association, 2008b. World Steel in Figures 2008. Segunda edición. Bruselas, Bélgica. Disponible en <http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/WSIF%202008%202nd%20edition.pdf>

World Steel Association (WSA). 2009. Steel Statistical Yearbook 2008. Disponible en <http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/SSY2008%5B1%5D.pdf>

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Farla, J., Schaeffer, R. 1997. Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators. *Energy Policy* 25 (7-9): 727-744.

Worrell, E., Price, L., Martin, N., 2001. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector. *Energy* 26: 513-536.

Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. 2008. World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors. Berkeley (U.S.A): Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL-62806, Rev. 2.

<http://www.minerometal.ccoo.es/%5Cficpdf%5C67Historia%20de%20la%20Siderurgia%20Integral%20Espa%C3%B1ola2.pdf>

<http://www.ilo.org/public/english/dialogue/sector/papers/insider/index.htm>

http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_III.html