



1 01178

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA DEPI**

**ANALISIS DE LOS CAMBIOS EN EL CONSUMO DE  
ENERGIA EN LA INDUSTRIA MEXICANA DE LA  
CELULOSA Y EL PAPEL Y SU SITUACIÓN EN EL  
CONTEXTO INTERNACIONAL**

**Tesis que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Energética**

**Presenta:**

**VERONICA FLORES GARCIA**

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



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE 2002**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA DEPTI**

**ANALISIS DE LOS CAMBIOS EN EL CONSUMO DE  
ENERGIA EN LA INDUSTRIA MEXICANA DE LA  
CELULOSA Y EL PAPEL Y SU SITUACIÓN EN EL  
CONTEXTO INTERNACIONAL**

**Tesis que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Energética**

**Presenta:**

**VERONICA FLORES GARCIA**

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

**Jurado:**

**Presidente: Ing. Jacinto Viqueira Landa**

**Secretario: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo**

**Vocal: Dr. Mariano Bauer**

**Primer Suplente: Dr. Víctor Rodríguez Padilla**

**Segundo Suplente: Dr. Gerardo Serrato Angeles**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas  
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso  
el contenido de mi trabajo receptor

NOMBRE: Veronica Flores  
García

FECHA: 6- noviembre - 2002

FIRMA: [Firma]



**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE 2002**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## **Dedicatoria:**

A los dos grandes amores de mi vida:

Mi esposo Eugenio (complice, mejor amigo y mi principal apoyo cuando las cosas se encuentran turbulentas); y a mi hijo Eugenio que con su sonrisa y su amor me da motivos para ser un mejor ser humano.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Agradecimientos:

Ninguna tesis puede llevarse a cabo sin el apoyo de personas que permiten hacer el camino menos difícil, por ello mis sinceras gracias a: La Dra. Claudia Sheinbaum, por la propuesta del tema de tesis, que sin duda fue la semilla que dio origen a este trabajo.

A: Ing. Jacinto Viqueira, Dr Víctor Rodríguez, Dr. Gerardo Serrato y Dr. Mariano Bauer, por sus comentarios y su siempre buena disposición para atenderme.

A la M. I. Leticia Ozawa, por su amistad, apoyo y comentarios.

A mi incondicional y querido esposo, el Ing. Eugenio Torijano, que entre otras muchas cosas me apoyo con sus sugerencias y comentarios, así como en las correcciones a mi redacción y ortografía.

A la Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y el Papel (ATCP), por su disponibilidad y facilitarme información.

Al Ing. Eduardo Olmedo, quien con su amplia experiencia me orientó en la compleja industria de la celulosa y el papel.

A mi buen amigo Dr. Juan José Ambriz, por su orientación y apoyo.

Finalmente agradezco de forma muy especial:

A mis padres que con su amor, apoyo y buenos consejos, pusieron los cimientos del ser humano que soy.

A Fer, Bety y Ulises por sus amor y buena vibra.

A Sol, Claudia, Ale y Eugenio (I) por su amistad y cariño.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Índice

<b>Introducción</b>		<b>1</b>
<b>Capítulo 1</b>	<b>Industria de la Celulosa y el Papel</b>	<b>4</b>
1.1	Antecedentes históricos y situación actual de la industria de la celulosa y el papel	6
1.2	Generalidades de la industria de la pasta	10
1.3	Descripción de la elaboración de celulosa	12
1.3.1	Pulpa química	13
1.3.2	Proceso de pulpeo mecánico	14
1.3.3	Proceso químico termomecánico	15
1.4	Elaboración de papel	17
1.5	Evolución de la producción en la industria de la celulosa y el papel en México	20
<b>Capítulo 2</b>	<b>Metodologías de Índices de Cambio y Comparaciones Internacionales de Eficiencia Energética en la Industria de la Celulosa y el Papel</b>	<b>27</b>
2.1	Metodología del análisis de descomposición	28
2.2	Cálculo de las emisiones de bióxido de carbono para el sector Industrial	33
2.3	Metodología de comparaciones internacionales	36
2.4	Niveles de agregación en la metodología de comparaciones internacionales en la industria de la celulosa y el papel	38
2.4.1	Nivel agregado	39
2.4.2	Nivel desagregado	40
2.4.3	Nivel de eficiencia energética	42
2.5	Fronteras del sistema para la industria de la celulosa y el papel	45
2.6	Descripción de la metodología del análisis de descomposición basado en unidades físicas para la industria de la celulosa y el papel	47
<b>Capítulo 3</b>	<b>Cambios en el Consumo de Energía y Emisiones de Carbono en la Industria de la Celulosa y el Papel</b>	<b>52</b>
3.1	consumo de energía en la industria mexicana de la celulosa y el papel	53
3.2	Resultados de la aplicación de las metodologías de análisis de descomposición en la industria de la celulosa y el papel mexicana	55
3.2.1	Actividad	55
3.2.2	Estructura	56
3.2.3	Eficiencia energética	57
3.3	Análisis de descomposición	58
3.3.1	Análisis de estructura - eficiencia	61

3.4	Emisiones de carbono	63
3.4.1	Consideraciones para el consumo específico de energía y cambios en las emisiones de carbono en la industria mexicana de la celulosa y el papel	64
3.5	Comparaciones internacionales	68
3.6	Potencial de mejoramiento de eficiencia energética y medidas propuestas	74
<b>Conclusiones</b>		77
<b>Anexo 1</b>	<b>Factores de emisión de carbono para la electricidad de 1970 a 1999</b>	84
<b>Anexo 2</b>	<b>Descripción de las mejores prácticas en la industria de la celulosa y el papel</b>	85
<b>Anexo 3</b>	<b>Datos desagregados de la producción mundial de la industria de la celulosa y el papel</b>	89
<b>Glosario de términos</b>		90
<b>Abreviaturas</b>		94
<b>Bibliografía</b>		95

<b>TESIS CON FALLA DE ORIGEN</b>
--------------------------------------

## Indice de Figuras y Gráficas

Figura 1.1	Proceso de elaboración de la pulpa	13
Figura 1.2	Procesos de producción de la celulosa y el papel	16
Figura 1.3	Elaboración de papel	17
Gráfica 1.1	México: producción de pulpa y papel	21
Gráfica 1.2	México: estructura de producción de pulpa	22
Gráfica 1.3	México: estructura de producción de papel	23
Gráfica 1.4	Índices de utilización de fibra secundaria	24
Gráfica 1.5	México: utilización de fibras en la industria del papel	25
Figura 2.1	Pirámide de indicadores de eficiencia para la producción de celulosa y papel	42
Gráfica 2.1	Estructura / eficiencia en la industria de la celulosa y el papel	45
Figura 2.2	Fronteras del sistema energético de la industria de la celulosa y el papel de acuerdo al Balance Nacional de Energía	46
Gráfica 3.1	Consumo de energía en la industria mexicana de la celulosa y el papel	53
Gráfica 3.2	México: consumo de electricidad de la industria de la celulosa y el papel	54
Gráfica 3.3	México: participación de la autogeneración eléctrica en la industria papelera mexicana	58
Gráfica 3.4	México: comparación del CEE real y el de la mejor práctica para la industria de la celulosa y el papel 1970-1999	61
Gráfica 3.5	Emisiones de carbono por el consumo de combustibles en la industria de la celulosa y el papel	64
Gráfica 3.6	México: estructura del consumo de energía en la industria de la celulosa y el papel	66
Gráfica 3.7	Comparación internacional del CEEp real y de la mejor práctica para 1988	71
Gráfica 3.8	Comparación internacional del CEEp real y de la mejor práctica para 1999	72

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Introducción

El sector de la elaboración de la pasta y el papel se clasifica dentro de los grandes consumidores de energía; se estima que el consumo mundial de energía primaria durante 1992 fue de 8 EJ.<sup>1</sup> En México la energía que requirió la industria de la celulosa y el papel durante 1999 fue de 49.4 PJ lo que significó un incremento del 6.2% con respecto al año anterior, mientras que la participación correspondiente a esta rama fue de 3.8% en relación con el total del consumo energético industrial.

Entre 1970 a 1999 el consumo de energía primaria de la industria mexicana de la celulosa y el papel se incrementó de 21.72 a 67.92 PJ lo que significó una tasa anual de crecimiento de 3.0%. En lo que respecta al consumo específico de energía primaria (CEEp) disminuyó de 1970 a 1999 de 24.21 a 17.92 GJ/ ton papel. Esta reducción en el consumo de energía por unidad de papel, se debió principalmente a cambios estructurales dentro de la industria; al aumento del uso de fibra secundaria y algunos cambios tecnológicos que participaron en el aumento de la eficiencia energética en su conjunto.

Debido a que la industria mexicana de la celulosa y el papel se clasifica entre las más intensivas en el uso de energía, es también una importante fuente de emisiones de bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en nuestro país, las cuales a su vez se encuentran vinculadas con el cambio climático global.

Los riesgos del cambio climático global que se deben principalmente al incremento de las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera al acentuar el efecto invernadero, generan importantes riesgos a la salud del ser humano, a la vitalidad de los bosques y áreas naturales, así como a la productividad de zonas agrícolas; afectando principalmente a países con escasos recursos económicos o en vías de desarrollo como es el caso de México.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)<sup>2</sup> entre las opciones que existen para limitar el impacto en el cambio climático global se encuentran:

- Reducir la demanda de energía en las actividades altamente intensivas

<sup>1</sup> Farla J, Blok K. and Schipper L, 1997, " Energy efficiency developments in the pulp and paper industry: a cross-country using physical production data " en Energy Policy, vol 25 no 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 745.

<sup>2</sup> Expuestas en 1990, Turquenber, 1995 y mencionadas en Phylpsen et. al. 1997.

- Reducir la energía requerida por actividad
- Reducir la intensidad de emisiones de carbono debido a las fuentes de energía

Algunos de los trabajos desarrollados en el tema, como el realizado por Ozawa L. exponen que : "Una de las opciones más importantes y efectivas en la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) es el mejoramiento de la eficiencia energética. Otra medida importante en la reducción del consumo de energía es el uso eficiente de los materiales a través del reciclaje y el diseño de productos que requieran una menor cantidad de energía en su fabricación".<sup>3</sup>

Debido a que la industria mexicana de la celulosa y el papel presenta las características ya antes mencionadas, se da cabida a los siguientes cuestionamientos: por un lado, es deseable conocer cuáles han sido los factores principales que promovieron los cambios en el consumo de energía en este sector y cómo han afectado éstos en las emisiones de gases de efecto invernadero, y por otro lado, determinar qué papel han jugado tanto las medidas de eficiencia energética y el uso eficiente de los materiales a través del reciclaje en dichos cambios.

Otro aspecto que también es de interés para esta investigación es conocer cuál es la posición que ocupa México en el contexto internacional, es decir, establecer una comparación internacional que permita conocer los siguientes aspectos: qué lugar ocupa este sector en lo que se refiere a mejoras de eficiencia energética y el uso eficiente de materiales, su situación actual y las expectativas de crecimiento y la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la actividad de este sector.

Una vez que se han establecido cuáles son los puntos de interés en los que gira el desarrollo de esta tesis se establecen las siguientes hipótesis:

- La reducción del consumo de energía a través de mejoras en la eficiencia energética y el creciente uso de papel reciclado, en nuestro país ha llevado a la industria de la celulosa y el papel a reducir las emisiones específicas de gases de efecto invernadero.
- Sigue existiendo potencial de mejoramiento energético y por ende posibilidad en la disminución de emisiones específicas de CO<sub>2</sub>, no sucede lo mismo con el incremento en el uso de papel reciclado.

---

<sup>3</sup> Ozawa, L. 2000, "Análisis del consumo de energía en el sector industrial mexicano y comparaciones internacionales: industria siderúrgica y cementera". Tesis de Maestría, UNAM, México.

La aportación de esta tesis es básicamente proporcionar información que permita conocer la evolución del consumo energético y los factores que influyeron en los cambios del mismo, y con ello establecer el papel que juegan en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, las mejoras en la eficiencia energética y los cambios relacionados con los factores estructurales de este sector.

Más allá del alcance de esta tesis los datos que se proporcionan forman parte de la información que se requiere para establecer y evaluar cuáles serían las mejores políticas, tanto nacionales como internacionales, en el mejoramiento de la eficiencia energética al mismo tiempo esta información permite comparar el potencial de eficiencia energética de los diferentes sectores y así evaluar cuáles sectores o cuáles medidas tienen el mayor potencial de ahorro de energía y mitigación de gases de efecto invernadero a un menor costo.

De acuerdo con Farla et. al., 1997,<sup>4</sup> para llevar a cabo un análisis de la influencia que tienen las mejoras en la eficiencia energética y los cambios estructurales (el uso eficiente de materiales a través del reciclaje forman parte de llamados factores estructurales) se requiere de una metodología que involucre el análisis de las variaciones en la intensidad energética que permite conocer las causas que han ocasionado las variaciones en el consumo de energía, ubicando los principales factores de cambio, la situación actual y las expectativas de crecimiento del sector celulósico papelerero.

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

La estructura de esta tesis se encuentra dividida en tres capítulos que se describen a continuación:

---

<sup>4</sup> Farla et. al. 1997, Op. Cit.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El capítulo 1 comprende tres partes; en la primera parte se da una reseña histórica de la industria de la celulosa y el papel en México, en la segunda se describen los procesos de elaboración de la celulosa y el del papel respectivamente y por último en la tercera parte se muestra la evolución de la producción en la industria de la celulosa y papel mexicana para el periodo de 1970 a 1999. El contenido de este capítulo aporta al lector una visión global de esta industria, su importancia y la evolución que ha tenido esta industria en nuestro país.

El capítulo 2 está compuesto de seis partes; en la primera parte se describe la metodología del análisis de descomposición propuesta por Schipper y Meyer,<sup>5</sup> el contenido de esta parte define los factores que, determinan las variaciones en el consumo de energía; en la segunda parte se describe esta metodología aplicada al cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>, en esta sección se describen los factores que promueven los cambio en las emisiones; en la tercera parte se describe la metodología de comparaciones internacionales y los parámetros comparativos entre un país y otro; enseguida la sección cuatro describe los niveles de agregación y se comentan los datos que se requieren para el análisis; la quinta parte define las fronteras del sistema, en esta sección se delimitan las fronteras de industria de la celulosa y el papel; y finalmente en la última parte se describe la metodología del análisis de descomposición en unidades físicas aplicada a la industria de la celulosa y el papel.

El capítulo 3 comprende 6 secciones; en la primera se muestran los cambios en el consumo de energía en la industria mexicana de la celulosa y el papel; en la segunda sección se describe la aplicación de la metodología de análisis de descomposición; en la tercera se muestran los resultados de la aplicación del análisis de descomposición; la sección cuatro describe los resultados para las emisiones de CO<sub>2</sub>; en la quinta sección se comentan los resultados del análisis de comparaciones internacionales y finalmente en la sección seis se mencionan brevemente las perspectivas del consumo de energía en la industria nacional de la celulosa y el papel.

---

<sup>5</sup> Schipper, L., and Meyers, S., with Howard, R. B. and Steiner, R., 1992, Energy efficiency and human activity; past trends, future prospects, Cambridge University Press, Cambridge.

## Capítulo 1

### Industria de la Celulosa y el Papel

Sin duda la industria papelera es un sector que contribuye al bienestar de los ciudadanos y de la sociedad proporcionando productos que satisfacen muchas necesidades diarias de la sociedad moderna. Los productos papeleros son necesarios como medio de comunicación y para transmisión de conocimientos (periódicos, revistas, libros, papel de fotocopias, papel de escritura, etc.), para la higiene personal (toallas, servilletas, manteles, rollos de cocina, papel higiénico, entre otros productos), para el transporte y protección de objetos (bolsas, sacos, cajas, etc.). La importancia de productos papeleros en muchas de nuestras actividades cotidianas contribuye sin duda a nuestro bienestar.

En México el sector celulósico paplero, representa sin duda, una de las ramas más importantes para el sector industrial, el aporte que ha tenido esta rama en el desarrollo de éste ha sido importante, en 1999 contribuyó en un 2.0% dentro del PIB manufacturero, mientras que del PIB industrial representó 1.5%, comparativamente con 1998 el PIB del sector celulósico paplero tuvo un incremento de 3.6%. Por otro lado esta industria es considerada como intensiva en el uso de energía; durante 1999 requirió de 49.4 PJ, lo que significó un incremento de 6.2% con respecto al año anterior, mientras que la participación correspondiente a esta rama fue de 3.8% en relación con el total del consumo energético industrial.

Entre 1970 y 1999 la producción nacional de celulosa creció a una tasa anual de 0.5% mientras que la producción de papel creció a una tasa anual de 5.1% para el mismo periodo. En este mismo periodo esta industria ha sufrido cambios importantes en la estructura<sup>6</sup> de producción tanto de la celulosa como el papel. En el caso de la celulosa destaca el incremento de producción de pulpas químicas en tanto en papel ha crecido la participación de los papeles sanitarios.

---

<sup>6</sup> La estructura de una rama industrial se puede definir de dos maneras: como la combinación de actividades o como la combinación de productos. La diferencia en estas definiciones puede ejemplificarse con la industria de la celulosa y el papel. Si la estructura se define como la combinación de actividades, ésta es diferente si el proceso de producción de pulpa es mecánico, químico u otro; mientras que si la estructura se define como la combinación de productos, lo importante es conocer la participación de los productos intermedios (celulosa virgen o fibra secundaria) o finales en la producción total (los diferentes tipos de papel: periódico, impresión, entre otros) y la eficiencia en la producción de cada uno de ellos. En la primera definición, un alto consumo de energía se explicaría a través de las diferencias en la estructura del sector, mientras que en la segunda a través de su eficiencia energética.

Otro factor estructural que ha sufrido cambios importantes en el sector celulósico papelerero es el continuo incremento del uso de la fibra secundaria para la producción de papel, lo que sitúa a México dentro de los primeros lugares a escala mundial en el reciclado.

### **1.1 Antecedentes históricos y situación actual de la industria de la celulosa y el papel.**

El papel fue inventado en China dos siglos antes de la era cristiana y su fabricación se extendió hacia Corea y Japón (610 D.C.) y de ahí al Asia –destaca Samarkanda–, norte de Africa y subsecuentemente a Europa. Aunque los egipcios obtenían de una planta (*Cyperus papyrus*) láminas para escribir denominadas papiros, -alrededor del 2400 A.C.-, las características de éstas son diferentes a las del papel, que se elabora de fibras previamente separadas.

Debe hacerse notar que en México, en la época precolombina, los pueblos autóctonos elaboraban láminas –semejantes al papiro- a partir de la corteza del amate y de hojas de maguey, entre otras.

Fue en España en donde por primera vez se manufacturó papel en Europa, en 1150; llevado por los árabes; para luego producirse en Francia (1189), Alemania (1320) e Inglaterra (1494).<sup>7</sup>

En México y América Latina la manufactura del papel y su comercio estuvieron supeditados en la Nueva España a las rígidas y limitantes disposiciones que la Corona le impuso durante trescientos largos años, hecho que no es posible ignorar. Para tal fin, constituyó diversos monopolios, y prohibió el establecimiento de talleres o actividades relacionados con la transformación de productos naturales. Esas restricciones, así como la expedición de la Real cédula (1638) del papel sellado, de seguro causaron el estancamiento de la elaboración del papel, misma que modestamente se había iniciado hacia fines del siglo XVI y principios del XVII.<sup>8</sup>

La historia de la industria del papel en los tiempos modernos, o sea del siglo XX, puede dividirse en varias etapas muy características de esta industria en todo el mundo. Es interesante notar que su evolución ha sido diferente de la mayoría de las otras industrias, tanto por su antigüedad como por su complejidad y variedad. De una forma u otra esta ha

<sup>7</sup> Petróleos Mexicanos, 1987, "Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía en la Industria de la Celulosa y el Papel".

sido un producto muy importante desde hace miles de años, entre los egipcios, los chinos y los otomíes en México. Sin embargo, su producción y comercio en escala industrial empezó realmente hasta el siglo décimo de nuestra era. Las materias primas eran inicialmente muy variadas; cortezas de árbol, fibras textiles, algodón y después trapos viejos.

Después del siglo XV la demanda de papel subió enormemente, y se fundaron muchas fábricas artesanales en Europa. Todas ellas basadas en los conocimientos empíricos tradicionales y con mucha mano de obra.

En México y América Latina no se desarrolló esta industria debido a las restricciones y prohibiciones de la Corona española, que no permitió la fabricación de papel en sus colonias.

A fines del siglo XIX, se fundó la fábrica de papel San Rafael, con capital francés y belga, instalando equipos modernos en esa época. Pocos años después se fundó la fábrica de Loreto. Que posteriormente se llamó Loreto y Peña Pobre, por el señor Alberto Lenz.

Por estas épocas se fundó también la fábrica de Progreso Industrial, también con una estructura similar a San Rafael, que después formó parte del grupo que se convirtió en el productor de papel más grande de América Latina por los años 50. Es interesante observar que estas fábricas se establecieron en zonas relativamente alejadas de la Ciudad de México, y con proyecto de fabricación de celulosa y explotación forestal desde sus principios. Estas dos fábricas continuaron su crecimiento durante más de medio siglo, y dominaron prácticamente la industria del papel durante muchos años. Es el típico caso de las compañías que entran y se desarrollan en un mercado naciente en cualquier país.

El desarrollo de la industria se vio frenado por la Revolución, durante varios años, pero a partir de 1914 se fundaron varias pequeñas fábricas, produciendo papeles y cartones de bajo precio y algunos productos de conversión, cajas, empaques y cartón gris. Todas esas fábricas empezaron en condiciones muy modestas, con maquinaria de segunda mano, técnicas antiguas o tradicionales y mucha mano de obra. Su materia prima principal era papel de desperdicio y en ocasiones celulosa importada.

Entre ellas se cuentan fábricas de papel Coyoacán, Negociación Papelera Mexicana, Cartonera Moderna, Papelera del Chabacano, Papelera El Fénix y La Aurora. Todas ellas situadas dentro de la Ciudad de México, que en aquellas épocas llegaba apenas a un

---

<sup>8</sup> Lenz H., 1990, "Historia del papel en México y cosas relacionadas 1525-1950", editorial Porrúa, México, p. 15.

millón de habitantes. Los únicos fabricantes de papeles de alta calidad seguían siendo San Rafael y Loreto, que había cambiado su nombre a Loreto y Peña Pobre. También eran los únicos productores de celulosas.

Hasta esta época tanto la industria del papel, así como muchas otras, estaban concentradas en la zona del Valle de México, principalmente por razones políticas y económicas; a pesar de que en esta zona escasea el agua y existían los problemas típicos de las grandes ciudades. El principal transporte de papel y materias en estas fechas era el ferrocarril, que cubría con bastante eficiencia la mayor parte del país. El transporte marítimo estaba reducido a la importación de papel y celulosa.

Al estallar la Segunda Guerra Mundial en 1939, se produjo una escasez general de papel en México, y América Latina, al desaparecer las importaciones desde Europa y reducirse considerablemente la exportación del papel desde Estados Unidos. Esto produjo una rápida expansión de la industria que benefició a todos los papeleros en general. Después de 1946 se establecieron otras importantes fábricas, algunas dedicadas a la fabricación de cajas corrugadas para consumo propio, especialmente de las cervecerías Modelo y Cuauhtémoc (Monterrey). Esto marcó la descentralización de la industria, que hasta entonces había estado concentrada dentro del Valle de México.

Hacia 1955 existían ya unas 20 fábricas de papel con 10 plantas de celulosa y pasta de madera para consumo propio. En 1956 empezó a funcionar Celulosa de Chihuahua, aprovechando los grandes recursos forestales de la zona central. Esta fue la primera fábrica de celulosa de mercado en México.

Esta planta que contó con una decidida protección política desde su principio, controló totalmente los precios y las importaciones de celulosa durante unos 20 años. También se estableció la primera fábrica de papel periódico, en Tuxtepec, que pasó pronto a ser propiedad de PIPSA formando un monopolio estatal del mercado de papel diario y algunos papeles de impresión. Con lo cual el gobierno controlaba prácticamente toda la prensa nacional. Esta duró más de 50 años.

Este tipo de monopolio se desarrolló poco en América Latina, y solamente hubo algunos intentos a este respecto en Perú, Chile y Argentina; ninguno de los cuales sobrevivió más de 5 años. Pero en México constituyó un freno para la industria del papel.

Lo primero tuvo como resultado la instalación de varias fábricas de celulosa relativamente pequeñas, especialmente 5 de bagazo de caña y dos de linters de algodón. Para 1970 había ya 18 plantas de celulosa de diversos tipos, y unas 45 fábricas de papel.

En 1971 se cambiaron las Leyes Forestales,<sup>9</sup> y en poco tiempo desaparecieron la mayor parte de las unidades forestales que suministraban la materia prima para las fábricas de celulosa. Este fue un fenómeno exclusivo de México, ya que en diversos países de América Latina se fomentó la explotación de bosques, y se establecieron grandes plantaciones comerciales. Eso fue la base de las grandes fábricas de celulosa del Brasil, Chile y Argentina, que a la fecha tienen un gran peso en la producción mundial.

Durante la crisis económica de 1982 a 1989 desaparecieron muchas fábricas de papel medianas y pequeñas. De 71 fábricas en 1982 quedaron 50. Como consecuencia de lo anterior, de la apertura comercial, y de otros factores internacionales, se ha producido un movimiento general de la industria del papel, que se puede calificar de global y que consiste en la formación de grandes grupos o consorcios que controlan gran parte del mercado del papel actualmente. Esta es una tendencia muy visible en todo el mundo, ya que seguramente continuará durante mucho tiempo.<sup>10</sup>

En la última década (1990-2000) en México quedan a la fecha solamente 5 fábricas de celulosa de tamaño medio, que producen exclusivamente para consumo interno (4 de madera y una de bagazo). Debido a lo anterior la mayor parte de la materia prima de las fábricas en México es el papel desperdicio o "fibra secundaria", en gran parte importado de los Estados Unidos y la producción de papeles blancos y de impresión deficitaria, importándose alrededor de un millón y medio de toneladas anuales.

Finalmente podemos decir que el principal reto que enfrenta la industria mexicana de la celulosa y el papel es superar algunos de los aspectos negativos que trae consigo la globalización, donde las afectadas han sido las pequeñas y medianas empresas y que en muchos casos no han logrado subsistir; esto se debe al fuerte nivel de competencia interna y externa, que en muchos casos es desigual, debido principalmente a que los precios de las celulosas para las empresas grandes son más bajos y a que el desarrollo tecnológico es más avanzado obteniendo con ello una mejor calidad de los productos. Sin

<sup>9</sup> Durante el periodo 1948-1977 las concesiones forestales a empresas nacionales para la producción fueron limitadas, durante el periodo de 1986-1992 se registró una disminución gradual de la producción maderable, los cambios más recientes a la Ley Forestal son las enmiendas legislativas de 1997 que dan un mayor estímulo a las plantaciones comerciales.

<sup>10</sup> Olmedo E., 2001, "Evolución de las fábricas de papel en México", conferencia impartida para la Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y el Papel".

embargo, históricamente esta industria ha logrado sobrevivir y cuenta con los recursos suficientes para crear los mecanismos que le permitan no solo subsistir, sino crecer en base a una buena planeación estratégica para este sector.

## 1.2 Generalidades de la industria de la pasta.

La industria papelera es una industria típica de transformación físico-química (más de la primera que de la segunda) de unos productos ya elaborados (la pasta de papel) y que se han obtenido previamente mediante proceso de extracción químico o físico-químico. No puede hablarse de industria papelera sin considerar simultáneamente la industria pastera, ya que ambas se complementan, y la tendencia es ir cada vez más a la integración de ambas fabricaciones por las ventajas de diversos tipos (una de ellas energética) que la integración presenta. No obstante, siguen existiendo fábricas de papel y fábricas de pastas separadamente.

La industria pastero-papelera se puede dividir en tres categorías: fábricas de pasta, en las que la materia prima es el vegetal y el producto final la pasta seca; fábricas integradas de pasta y papel, en las que la materia prima está constituida por el vegetal, más las pastas adicionales que intervienen, y el producto final es el papel y fábricas de papel, en las que la materia prima la constituyen las pastas y el producto final es el papel.

### La pasta papelera

No debe hablarse de pasta papelera, sino de pastas papeleras, abarcándose en esta denominación una gran gama de variedades, cada una de ellas con aplicaciones diferentes. En efecto, se parte de un vegetal como materia prima, en cuya constitución interviene mayoritariamente la celulosa y en proporciones menores de la lignina, pentosanas, grasas, ceras y sales minerales. El cuadro 1.1 muestra una clasificación preliminar de las materias primas celulósicas.

**Cuadro 1.1 Materias primas celulósicas**

De ciclo anual	Paja de cereales, bagazo de caña de azúcar, esparto.
De ciclo largo (maderas)	Fibra corta: chopo, eucalipto (frondosa) Fibra larga: pino, abeto (resinosas)

Fuente: Técnicas de conservación energética en la industria tomo II (ahorro en procesos), Ministerio de Industria y Energía, Comisaría de la Energía y Recursos Minerales, Centro de Estudios de la Energía, Madrid, 1982.

El cuadro 1.2 muestra valores medios de la composición química de los productos vegetales. Los componentes definidos en el citado cuadro no responden a productos de fórmula exactamente conocida sino que se trata de productos polimerizados muy complejos y que a la hora de definirlos cuantitativamente deben ir acompañados de información adecuada que permita conocerlos mejor. Así por ejemplo, al hablar de contenido en celulosa debe decirse por qué método se ha determinado, ya que el resultado es variable según se aplique uno u otro método.

**Cuadro 1.2 Composición química del vegetal (referido a residuo seco absoluto)**

Celulosa	Entre el 40-60 %
Hemicelulosa	Entre el 20-30%
Lignina	Entre el 20-30%
Compuestos orgánicos	Entre el 4-8%
Sales minerales	Entre el 2-6%

Fuente: Técnicas de conservación energética en la industria tomo II (ahorro en procesos) Ministerio de Industria y Energía, Comisaría de la Energía y Recursos Minerales, Centro de Estudios de la Energía, Madrid, 1982.

Vista la complejidad de la materia prima, cabe esperar otro tanto del producto obtenido, es decir, la pasta papelera. Estas pastas tienen propiedades diferentes según sea el grado de ennoblecimiento en celulosa a que se somete el vegetal.

El cuadro 1.3 muestra una gama de pastas en función de los rendimientos, y se complementan con el cuadro 1.1.

**Cuadro1.3 Tipos de pastas**

	Rendimiento
Pasta mecánica	90-98%
Pasta mecanoquímica	90-95%
Pasta semiquímica (a la sosa, al bismuto, al sulfito neutro)	60-90%
Procesos ácidos y alcalinos: cruda y blanqueada	50-60% y 45-50% respectivamente

Fuente: Técnicas de conservación energética en la industria tomo II (ahorro en procesos) Ministerio de Industria y Energía, Comisaría de la Energía y Recursos Minerales, Centro de Estudios de la Energía, Madrid, 1982.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A medida que se avanza en la nobleza de una pasta se aumenta su porcentaje en celulosa a la vez que se disminuye el de los componentes no celulósicos; así, la pasta mecánica cruda tiene una composición similar a la de la madera o vegetal materia prima, mientras que la celulosa noble contiene alrededor del 98% de celulosa.

Existen más de un millar de tipos de papel, diferenciados uno de otro por parámetros específicos tales como: peso, espesor, resistencia mecánica, color, dureza y porosidad. Normalmente estos papeles se pueden agrupar dentro de las siguientes categorías: periódico, impresión y escritura, empaque y embalaje, sanitario y facial y especiales.

### **1.3 Descripción de la elaboración de celulosa.**

A nivel mundial el proceso más utilizado para la obtención de pulpa se hace a través de medios químicos. En el caso de México durante 1999 el 91.1% de la producción de celulosa se hizo con medios químicos.

En virtud de que en los vegetales las fibras de celulosa se encuentran asociadas con lignina y algunas otras sustancias no deseables,<sup>11</sup> desde el punto de vista de elaboración de papel, los procesos de pulpeo se centralizan en una remoción selectiva de tales impurezas, utilizando la mayoría de las veces reactivos químicos. En México se producen las siguientes celulosas vírgenes, las cuales pueden ser sometidas a un proceso de blanqueo de acuerdo a su aplicación.<sup>12</sup>

- Celulosa mecánica (proveniente de maderas coníferas)
- Celulosa termomecánica (de madera de coníferas y especies latifoliadas)
- Celulosa química de madera (al sulfato y a la sosa)
- Celulosa química de plantas anuales (obtenida mediante el cocimiento alcalino de bagazo de caña de azúcar o pajas de cereales)

El tipo de pasta es un variable fundamental en la elaboración del papel. Las dos características más importantes del papel que determinan su uso son: su color y resistencia. El color depende en gran medida de si la fibra celulósica recibió o no una eliminación de grupos cromóforos en etapas sucesivas de blanqueo; la resistencia es función, entre otras cosas, del largo de las fibras que conforman el papel y del grado de

<sup>11</sup> Pectinas, resinas y taninos, entre otros.

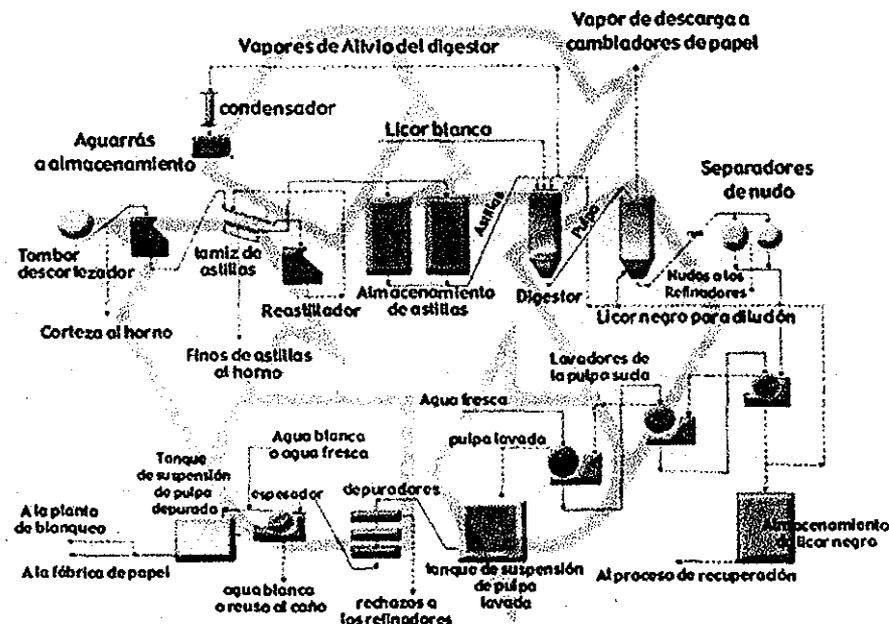
deslignificación alcanzado. Para escritura e impresión se requiere papel blanco y brillante; para embalaje, papeles duros y resistentes; para usos higiénicos, papeles absorbentes y suaves.

### 1.3.1 Pulpa química

Dentro de los procesos alcalinos de obtención de pulpa a partir de madera, el denominado al sulfato o "kraft" es el más difundido en el ámbito nacional (55.3% de la pulpa nacional se obtuvo con este proceso durante 1999).<sup>13</sup> Las operaciones básicas para la obtención de pulpa se muestran en la figura 1.1.

En la primera fase del proceso la madera es astillada y tamizada, este proceso consume aproximadamente 30.3 kWh/ton de materia prima,<sup>14</sup> antes de pasar al tanque digestor, en el tanque tienen lugar una serie de reacciones químicas muy complejas. El proceso en el digestor es básicamente un cocimiento, bajo condiciones controladas de presión (7-8 Kg/cm<sup>2</sup>) y temperatura (175°C). En este periodo se hidrolizan mediante reactivos alcalinos determinados enlaces de la lignina. El efecto químico se lleva de tal manera que se asegure el menor degradamiento de las fibras celulósicas.

**Figura 1.1** Proceso de elaboración de la pulpa



Fuente: Cámara Nacional de las Industrias de la celulosa y el papel, pagina web 2000, <http://www.cnicp.org.mx/>

<sup>12</sup> Petroleos Mexicanos, 1987, "Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía en la Industria de la Celulosa y el Papel".

<sup>13</sup> Memoria Estadística de la Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel (CNICP), 2000.

<sup>14</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Nilsson et al., 1995; Giese, 1989; Giraldo and Hyman, 1994; Jaccard and Willis, 1996.

El nombre del proceso "al sulfato" se deriva de que para reponer el sulfuro gastado se adiciona sulfato de sodio en la corriente de licor negro que es alimentado al horno de recuperación de reactivos. La denominación de "kraft" parte de la palabra alemana que significa resistente.

Cuando la digestión a finalizado, los productos principales consisten en una pulpa cruda de color café y de licor negro. El licor negro es una mezcla compleja de material orgánico y reactivos sobrantes. La economía de este proceso de pulpeo, depende en gran parte de un adecuado sistema para recuperar los reactivos empleados en la etapa de digestión.

El licor negro y la pulpa se separan mediante operaciones de filtración y lavado, durante este proceso se consume aproximadamente 4.4 GJ/ton de pulpa de vapor y 406 kWh/ton de pulpa de electricidad.<sup>15</sup> Se recuperan, como parte de las operaciones descritas, una serie de subproductos tales como aguarrás, aceite de bogol, jabón, brea, etc.

La pulpa cruda sufre una serie importante de operaciones para su depuración y blanqueo, el consumo de energía en la etapa de blanqueo depende de la tecnología utilizada, un consumo promedio típico requiere de 4.3GJ/ton de pulpa de vapor y 159 kWh/ton de pulpa de electricidad,<sup>16</sup> dependiendo de su destino de uso; primeramente se tamiza y lava con agua, se filtra y se vuelve a lavar de acuerdo con el grado de brillantez que se desea obtener.

Cabe mencionar que cuando se trata de fabricas que producen únicamente pasta, se requiere de un proceso de secado. El de secado de pulpa es intensivo en el consumo de energía, se estima que se requiere aproximadamente 4.5GJ de vapor por tonelada de pulpa y 155kWh/ton de pulpa de electricidad.<sup>17</sup>

### 1.3.2 Proceso de pulpeo mecánico

Este proceso implica la reducción de la madera a su estado fibroso por medios puramente mecánicos; esto es, sin empleo de reactivos químicos. Este proceso fue desarrollado en 1843 e incluye la molienda en húmedo de la madera hasta obtener una pasta fibrosa, empleándose una piedra de carburo de silicio. En este molino los trozos de madera suaves se fuerzan contra el mortero, el cual funciona casi idénticamente a una piedra de esmeril, este proceso requiere aproximadamente 1650 kWh/ton de pulpa.<sup>18</sup> Al girar dicho

<sup>15</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996; Nilsson et al., 1995; Giraldo and Hyman, 1994.

<sup>16</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996; Nilsson et al., 1995.

<sup>17</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996; Nilsson et al., 1995.

<sup>18</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996.

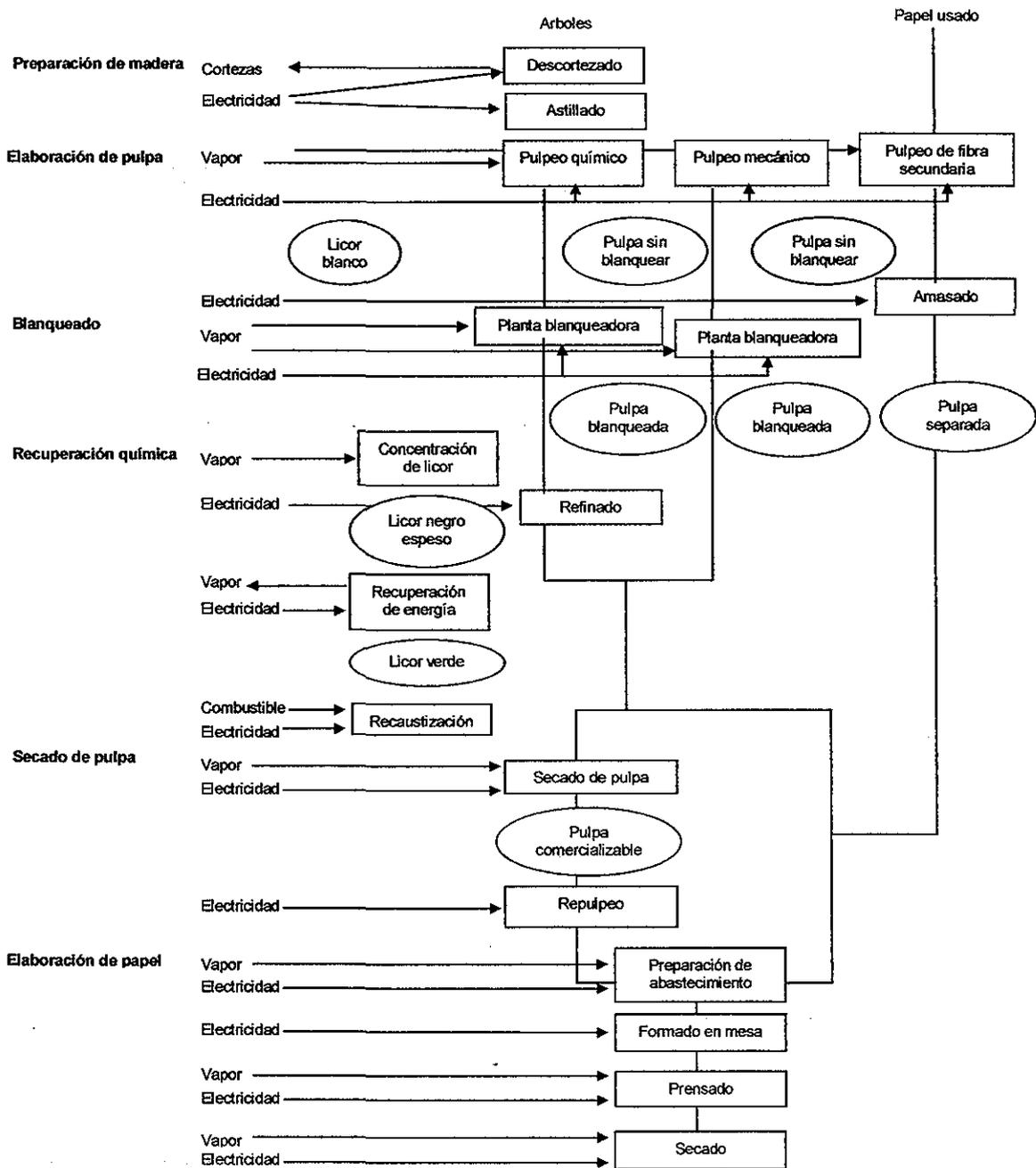
medio transforma a la madera en sus componentes fibrosos, la pasta así formada es arrastrada fuera del molino por un flujo de agua que es asperjado en la superficie de la piedra y que a su vez absorbe el calor desprendido por la fricción. La pasta obtenida es depurada en cribas centrífugas y de aquí enviada a una operación de blanqueo en donde se trata con una solución de hidrosulfito de zinc.

### 1.3.3 Proceso químico termomecánico

Este tipo de pulpeo se inicia al introducir la materia prima celulósica, bagazo desmedulado de caña de azúcar o astillas de madera en una tolva, la cual descarga a un alimentador de tornillo. Este alimentador tiene como objetivo forzar a que entre el material celulósico por un tubo digestor, el cual se encuentra presurizado por la adición de sosa/sulfito de sodio a fin de que a su paso a través del digestor provoque una deslignificación moderada en la madera de bagazo. La adición simultánea de vapor y reactivos químicos conlleva a instalar menor potencia en la etapa de desfibrado del proceso. La pasta ablandada que sale del digestor, es lavada y depurada para de aquí desfibrarse en un tándem de refinadores de doble disco. Dependiendo del mercado, la pulpa cruda obtenida puede laminarse para venta o bien blanquearse utilizando peróxido de hidrógeno. El consumo promedio de vapor para este proceso se estima en 0.9 GJ/ton de pulpa mientras que el consumo de electricidad se estima en 2041 kWh/ton de pulpa,<sup>19</sup> la figura 1.2 muestra los puntos de consumo de energía más importantes durante los distintos pasos en el proceso de producción de la celulosa y el papel.

<sup>19</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996; Pulp and Paper, 1998.

Figura 1.2 Procesos de producción de la celulosa y el papel



Fuente: Martin, N., Aglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrel, E., Price, L. K., julio 2000, Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the U. S. pulp and paper industry, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.4 Elaboración de papel.

### Proceso del papel

En virtud del gran número de tipos de papel que se producen sería muy extenso referirse a cada uno de ellos. Sin embargo, a manera muy general, se puede decir que la manufactura de papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, las cuales se basan en la tendencia de las fibras celulósicas en suspensión acuosa a unirse entre sí cuando se secan. El proceso de la elaboración se lleva a cabo en dos grandes áreas, la primera se refiere a la preparación de pastas, mientras que la segunda atañe a la formación del papel propiamente dicha, tal como se muestra en la figura 1.3.

Figura 1.3 Elaboración de papel



Fuente: Cámara Nacional de las industrias de la celulosa y el papel, pagina web 2000, <http://www.cnip.org.mx/>

Esta etapa cubre operaciones como la recepción y almacenamiento de materias primas, repulpeo, limpieza y refinación de material celulósico antes de su entrega a la máquina formadora de papel.

### Materias primas

Estas consisten de pulpas vírgenes de celulosa, fibras secundarias, encolantes y cargas. Las fibras vírgenes provienen del pulpeo de madera o de plantas anuales y dependiendo tanto del grado de integración productiva (astillas, celulosa, papel y su manufactura), como del tipo de papel a manufacturar, éstas se reciben ya sea como suspensión o como pliegos, los cuales pueden estar sin blanquear o blanqueados.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los pliegos de pulpas registran por lo general un contenido de humedad cercano al 10%, debido a esto, previamente deberán hidratarse mediante repulpeo. Por otra parte las fibras secundarias o fibras recobradas son las que se obtendrán del reprocesamiento de cartón y papel de desperdicio.

La adición de los encolantes tiene como objetivos principales otorgar al papel propiedades permeables, aumentar su resistencia a la tensión, al dobléz, a la exposición y, junto con las cargas, propiciar una superficie que sea adecuada a escritura e impresión.

Entre los encolantes más usuales se encuentran las breas de colofina, los "almidones modificados", la carboximetilcelulosa, y, recientemente, las resinas sintéticas de urea-formaldehído o de melaminaformaldehído.

Por lo que respecta a las cargas, citaremos que éstas son materias de relleno cuya función es la de ocluir los huecos que de manera natural se originan al momento de unirse las fibras de la celulosa en la sección de formación de la máquina de papel.

Dentro de las cargas más usualmente empleadas se pueden citar a los silicatos, tal como: el caolín y asbestinas, el carbonato de calcio y de magnesio, el dióxido de titanio, las tierras diatomáceas y, entre las más apreciadas al sulfuro de zinc y el litopón.

### Repulpeo

Con el reclamo de las cantidades necesarias de fibras celulósicas y su depósito en los "hidrapulper" de la fábrica, da comienzo la operación del repulpeo. Cabe mencionar que esta operación es imprescindible en papeleras cuya principal fuente de fibra es el papel recuperado o bien en aquellas no integradas a plantas de pulpa.

En el repulpeo se convierte en una suspensión fibrosa o pasta a todo aquel material celulósico que se reciba en forma seca, adicionando la cantidad adecuada de agua en el hidrapulper o "molino". El hidrapulper es un recipiente metálico, de forma cilíndrica vertical, en cuyo fondo se encuentra un rotor o rodete, acoplado por lo general a un motor eléctrico. El continuo accionar de dicho rotor o rodete origina que los diferentes materiales en estado sólido se abran dejando a su vez en libertad las fibras de celulosa. La descarga de la pasta, se realiza a través de una placa perforada ubicada en el fondo de hidrapulper y que actúa como criba al evitar el paso de partículas extrañas al proceso, tales como grapas, alambres, etc.

Es importante mencionar que durante la operación de repulpeo se efectúa la adición de polvos minerales (cargas) así como un encolado interno de las fibras. Este caso particular

de encolado se lleva a cabo agregando breas de colofina, saponificadas y alumbre (sulfato doble de potasio y aluminio hidratado) como depersante de dicha brea.

### Limpieza y depuración

Aunque al momento de drenar los hidrapulpers se efectúa una retención de partículas indeseables, ésta no deja de ser demasiado burda y por lo tanto puede permitir que alguna de ellas llegue a dañar a los refinadores o bien a la máquina de papel. Aunado a lo anterior está el hecho de que cierto tipo de papeles requieren para su comercialización cumplir con estándares de limpieza muy elevados. Por ende, un área de preparación de pasta debe contar con los dispositivos que permitan seguir procesando la suspensión obtenida en el repulpeo en forma continua.

### Refinación

Las fibras de celulosa tal y como sale del paso de depuración son inapropiadas para la manufactura de papel, por lo que deben someterse a un tratamiento de modificación superficial. Dicha modificación se realiza al pasar a través de equipos denominados batidores o refinadores.

Durante la refinación, las fibras de celulosa se separan e hidratan a plenitud, se fibrilan y cortan aprovechando que ya en este paso las fibras se encuentran hinchadas por la absorción de humedad, lo que las hace flexibles y manejables. En general, se aduce que con la refinación la capacidad de adhesión entre fibras se incrementa, debido a la modificación originada en su superficie.

Anteriormente, la operación en cuestión se efectuaba en una "pila holandesa", hoy en día se realiza en refinadores continuos del tipo Jordan (cónicos) o del tipo doble disco. Los últimos presentan más ventajas operacionales que los del tipo cónico.

### Formación de papel

La máquina para elaborar el papel en forma continua, convierte una suspensión fibrosa muy diluida en una hoja seca a velocidad relativamente elevada. La máquina Fourdrinier o de mesa plana consiste básicamente en una malla sin fin, la cual se desplaza a velocidades que oscilan desde una décima de metros por minuto hasta cerca de 1500 metros por minuto.

En uno de los extremos de esta malla se deposita, en régimen laminar, la suspensión fibrosa, que previamente se ha vuelto a refinar, durante la etapa previa para obtener el

stock de fibra se tiene un consumo de energía aproximado de 274kWh/ton de papel de electricidad y 0.7 GJ/ton de papel de vapor,<sup>20</sup> al depurar y diluir hasta alcanzar una consistencia cercana al 0.8%. Conforme avanza la suspensión a través de la máquina, va perdiendo humedad, originándose simultáneamente el entrelazamiento de las fibras para conformar la hoja de papel.

La operación de desaguado se efectúa cuando la malla pasa sobre cajas de succión y rodillos de mesa, ubicados en la sección de formación de la máquina. En el extremo opuesto de la malla se obtiene una hoja de papel todavía muy húmeda a 20% de consistencia (contenido de fibra en solución) aproximadamente, por lo que a través de un transportador de fieltro de lana, se conduce a varios juegos de prensa en donde pierde más humedad también en forma mecánica. Ambos procesos de formado y prensado demandan un consumo de energía eléctrica de 238 kWh/ton de papel.

Por lo anterior, dependiendo del diseño de las prensas, las hojas se entregan a los secadores de la máquina con una consistencia entre 33 y 48%.

Por otra parte, cuando se manejan gramajes bajos de papel, como por ejemplo higiénicos y faciales, se aplica un sólo tambor rotatorio cuya dimensión es notablemente superior a los instalados para la deshidratación de papeles de escritura, impresión y empaque.

A fin de incrementar la capacidad evaporativa de la sección de secado, es común utilizar una serie de quemadores a gas, los cuales permiten insuflar aire ambiente a temperaturas altas. El consumo de energía durante el secado es relativamente alto, se estima que el consumo es de 10 GJ/ton de papel de vapor y 21 kWh/ton de papel de electricidad.<sup>21</sup>

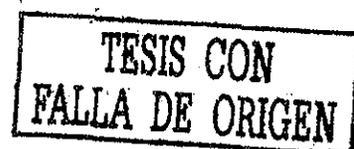
### **1.5 Evolución de la producción en la industria de la celulosa y el papel en México.**

La industria de la celulosa y el papel contribuyó en un 2.0% dentro del PIB manufacturero en 1999, mientras que del PIB industrial representó 1.5%, comparativamente con 1998 el PIB del sector celulósico papelerero tuvo un incremento de 3.6%.

Al examinar los resultados de la producción de la celulosa durante 1999, respecto al año anterior, se observa un incremento marginal de 3.4% representando 18 mil toneladas,

<sup>20</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996.

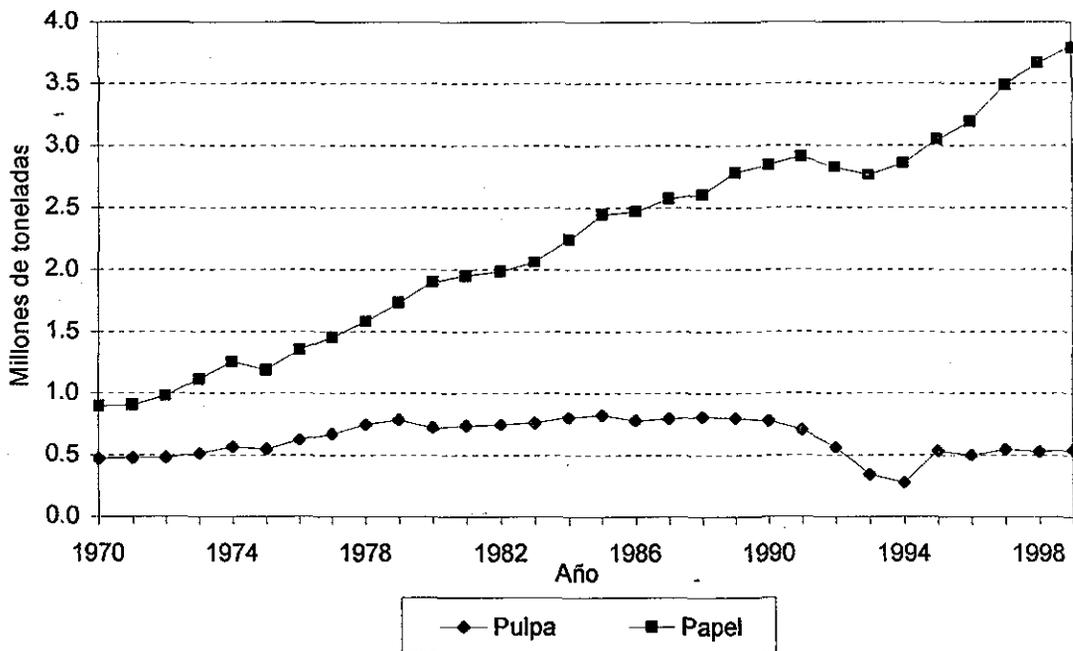
<sup>21</sup> Elaahi and Lowit, 1988; Jaccard and Willis, 1996; Nilsson et al., 1995.



mientras que la producción total del papel en el mismo año es también de 3.4% (con respecto al mismo periodo del año anterior), equivalente a 127 mil toneladas.<sup>22</sup>

Entre 1970 y 1999 la producción de celulosa muestra cuatro periodos muy claros, primero de 1970 a 1979 crece sostenidamente a una tasa anual de 5.8%, después prácticamente se estanca hasta 1989. Posteriormente disminuye abruptamente al 19.2% alcanzando su mínimo histórico del periodo en 1994; por último, después de casi duplicarse la producción al año siguiente, esta muestra variaciones muy ligeras en ambos sentidos en los cuatro años finales del periodo. De forma global, estos cambios representan un crecimiento de 0.5% anual en todo el periodo. Por otro lado, la producción de papel aumentó constantemente a una tasa anual de 5.1% para el mismo periodo como se puede ver en la gráfica 1.1.

**Gráfica 1.1 México: Producción de Pulpa y Papel**



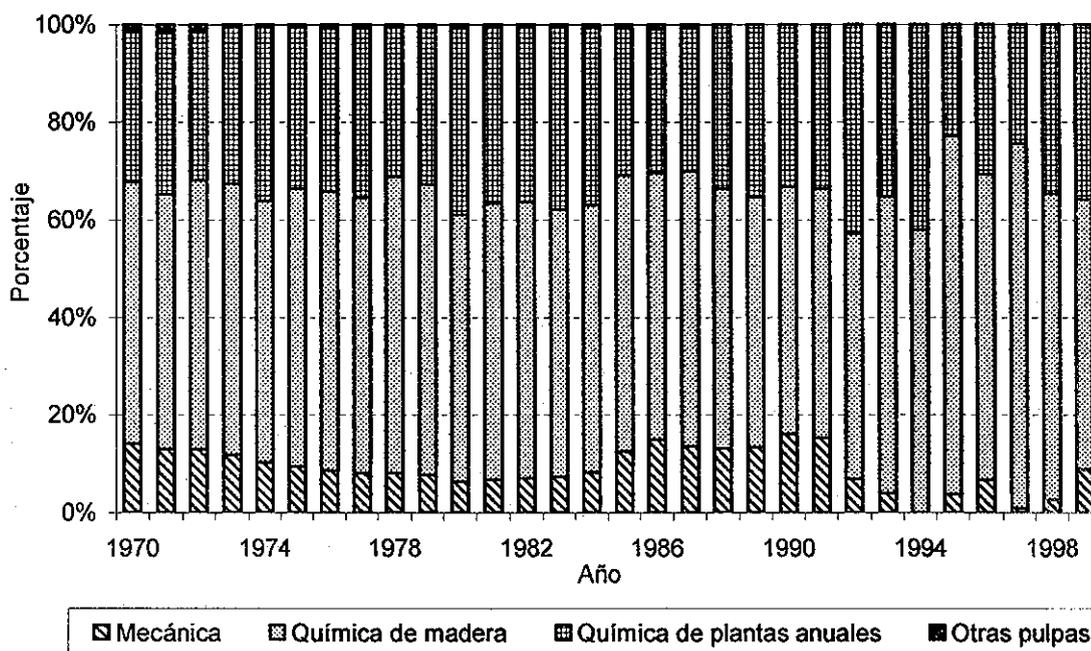
Fuente: Pemex, 1987, Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía de la Celulosa y el Papel. CNICP, 1993 y 2000, Memoria Estadística.

En 1999 se tuvo una capacidad instalada de 758 miles de toneladas anuales de celulosa, con un aprovechamiento de 71.8%, el consumo de celulosas y por tanto su producción, es función de la demanda por clase de papel y de los precios relativos de los diversos tipos

<sup>22</sup> Memoria Estadística de la Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y el Papel, 2000.

del primer material, la estructura de producción fue la siguiente: 55.3% de celulosa química de madera, 35.8% de celulosa química de plantas anuales, 8.9% de pastas mecánicas de madera, destaca la elevada participación de la producción de celulosa a partir de bagazo de caña en México. En la gráfica 1.2 se puede ver la evolución histórica de la estructura de producción por tipo de celulosa.

**Gráfica 1.2 México: Estructura de Producción de Pulpa**



Fuente: Pemex, 1987, Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía de la Celulosa y el Papel. CNICP, 1993 y 2000, Memoria Estadística.

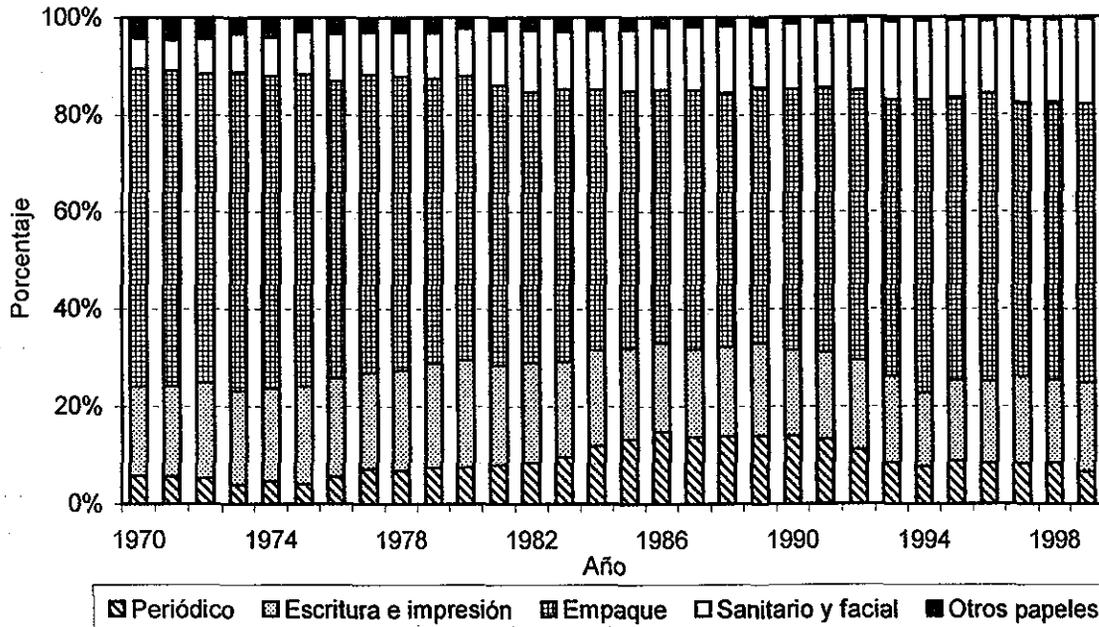
El hecho de que la producción de celulosa no haya crecido al mismo ritmo que la producción de papel, se explica, por los cambios en las Leyes Forestales lo que ocasionó la desaparición de las unidades forestales que suministraban la materia prima para las fábricas de celulosa, debido a lo anterior la industria de la celulosa ha tenido que cerrar muchas plantas por la imposibilidad de competir con los precios internacionales de pulpa y de sus sustitutos, así como el incremento en el uso de papel reciclado de importación.

El país tuvo en 1999 una capacidad instalada de 4428 miles de toneladas por año para la producción de papel, cifra que representó una tasa de utilización de 85.7%, la estructura productiva en 1999 correspondió a: 24.9% para escritura e impresión (incluye papel para periódico), 57.1% para empaque, 17.4% de papel sanitario y facial y 0.6% de papeles

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

especiales (China, crepé, Glassine, entre otros). En la gráfica 2.3 se observa los cambios en la estructura de producción por tipos de papel.

**Gráfica 1.3 México: Estructura de Producción de Papel**



Fuente: Pemex, 1987, Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía de la Celulosa y el Papel. CNICP, 1993 y 2000, Memoria Estadística.

Cabe mencionar que el nivel de consumo de papel está estrechamente relacionado a la actividad económica del país. En periodos de expansión de la economía aumenta la demanda de artículos de empaque y embalaje, de manera paralela con la producción industrial y el ingreso per cápita. En caso contrario, con la contracción económica, se dan reducciones en este tipo de consumos.

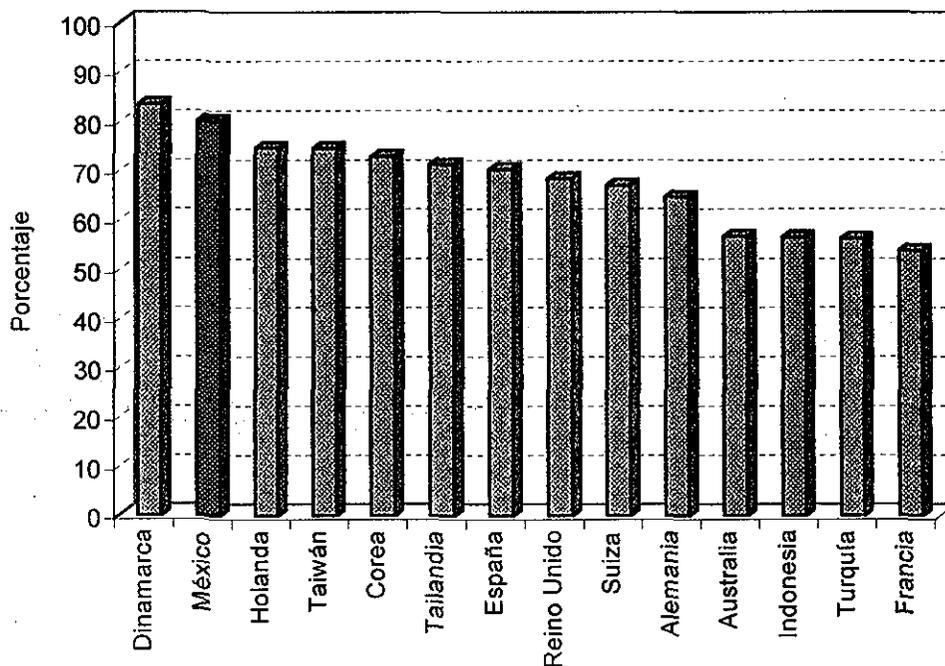
La economía de escala con que opera esta industria, la hace rentable a elevados volúmenes de producción y con tecnología altamente intensiva en capital. Este hecho reduce las posibilidades de los países en desarrollo que desean independizarse en cuanto a la producción y el abasto de papel.

Derivado del incremento continuo en los precios de las materias primas y de los combustibles, la selección de nuevos procesos de fabricación de celulosa y papel ha adquirido una importancia relevante, al igual que la ampliación de los procesos de reciclado para el aprovechamiento de mayores cantidades de papel de desecho.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El continuo incremento en el uso de la fibra secundaria para la producción de papel, sitúa a México dentro de los primeros lugares a escala mundial en el uso de papel reciclado, esta situación se puede observar en la gráfica 1.4 que muestra el índice de utilización de fibra secundaria durante 1998.

**Gráfica 1.4 Índices de Utilización de Fibra Secundaria**

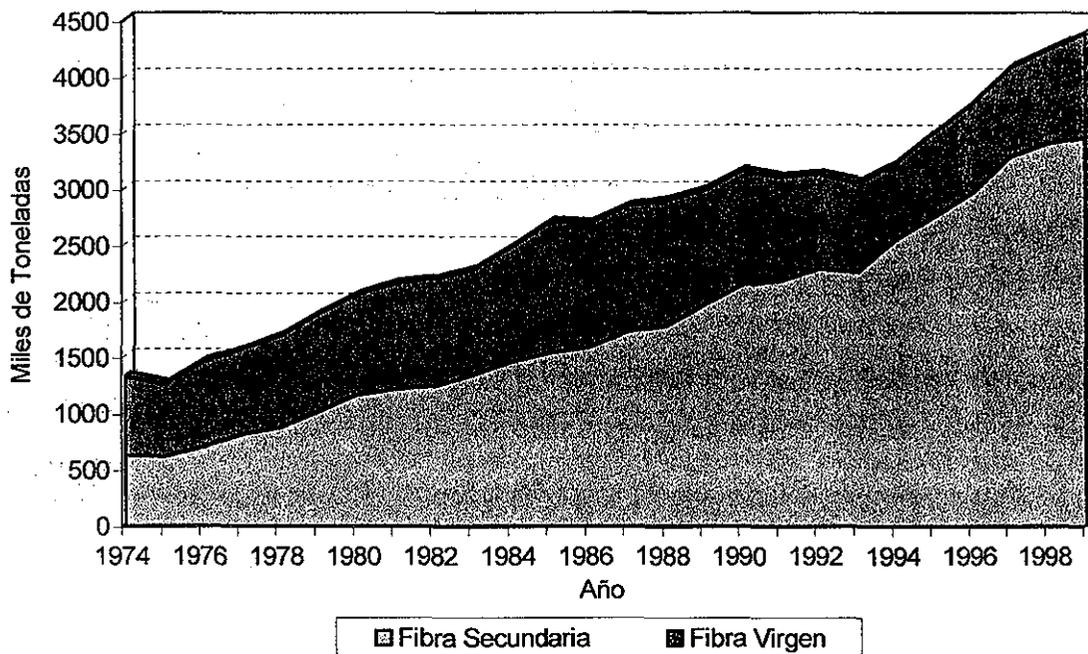


Fuente: Pulp and Paper International, julio 1999.

El consumo total de materiales fibrosos para la fabricación de papel en 1999, tuvo una composición fibrosa con una proporción mayor de fibras secundarias, las cuales representan el 78.5% del consumo total de fibras y el restante 21.5% corresponde a fibras vírgenes. La evolución en la composición del consumo de materiales fibrosos se muestra en la gráfica 1.5, en donde se observa el incremento de la participación de las fibras secundarias, en el sector celulósico papelerero mexicano.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Gráfica 1.5 México: Utilización de Fibras en la Industria del Papel**



Fuente: Pemex, 1987, Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía en la industria de la Celulosa y el Papel. CNICP, 1993 y 2000, Memoria Estadística.

### Conclusiones

A través de un breve recorrido histórico de la industria papelera en México; es posible observar las distintas etapas de esta industria, desde las limitantes disposiciones de la Corona Española en la Nueva España, pasando por la Segunda Guerra Mundial, que produjo una rápida expansión en nuestro país y que benefició a todos los papeleros en general, hasta la situación actual en que se encuentra esta industria.

En cuanto las distintas actividades para la elaboración de pulpa (que son los diferentes medios para su fabricación: mecánicos, químicos u otros), secado de pulpa, preparación de la fibra secundaria y la elaboración de papel, permite ver la complejidad relacionada con la estructura de producción. En nuestro país la estructura de producción ha cambiado de la siguiente forma:

En 1970 la producción de pulpas con medios químicos representó el 84.8% del total de la producción, en tanto que el 14% fue producida con medios mecánicos y 1.3% de otras pulpas, en tanto que en 1999 la estructura de producción fue de 91.1% de pulpas químicas y 8.9% de pulpas mecánicas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En lo que se refiere a la estructura de producción de papel en 1970 estuvo dada como sigue: 5.6% de papel periódico, 18.5% de papel escritura e impresión, 65.3% de papel empaque, 6.3% de papel sanitario y 4.2% de otros papeles; en tanto que en 1999 estuvo compuesta por: 6.4% de papel periódico, 18.4% de escritura e impresión, 57.1% de papel empaque, 17.4% de papel sanitario y 0.6% de otros papeles.

*Finalmente en cuanto a los cambios estructurales relacionados con el uso de material reciclado; se observó que este factor es el que más ha cambiado su participación, ya que en 1970 fue 45.2%, mientras que el 54.8% correspondió a fibras vírgenes, para 1999 las fibras secundarias representaron el 78.7% en el consumo total de fibras y el restante 21.3% correspondió a fibras vírgenes.*

Como se puede ver, los cambios estructurales de producción (tipos de pulpas y tipos de papel) y de productos intermedios (participación de material reciclado y/o pulpa virgen) han presentado importantes variaciones durante el periodo de análisis de 1970 a 1999, lo que sugiere la influencia de estos en la variación del consumo de energía sobre todo considerando las distintas cantidades de energía que se requieren durante cada etapa del proceso. En el siguiente capítulo se explican las metodologías de análisis de descomposición y de comparaciones internacionales, las cuales utilizan como parámetros de análisis; la actividad del sector (producción); los factores estructurales (mencionados en este capítulo) y la intensidad energética.

A través de la aplicación de estas metodologías se determinan los cambios en el consumo de energía y la emisiones de carbono, también se establecen las comparaciones internacionales, y por último el potencial de mejoramiento de eficiencia energética y algunas medidas de ahorro de energía propuestas para la industria de la celulosa y el papel.

## Capítulo 2

### **Metodologías de Índices de Cambio y Comparaciones Internacionales de Eficiencia Energética en la Industria de la Celulosa y el Papel**

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

Existen diversas metodologías de índices de cambio que permiten valorar el peso que han tenido los factores estructurales o de eficiencia energética en el consumo de energía. La aplicación de estas metodologías y de sus variables explicativas depende tanto de los objetivos del análisis, como de la información disponible. En el caso del sector industrial, una de las metodologías más utilizadas es la de intensidades energéticas basada en indicadores económicos (energía por unidad de valor agregado). Sin embargo, cuando la información está poco desagregada, como en el caso de los indicadores económicos, es difícil separar con claridad el peso relativo de los factores estructurales y de eficiencia.<sup>23</sup>

Por ello si se desea separar con más claridad el peso relativo de los factores estructurales y de eficiencia energética, se requiere aplicar una metodología basada en variables físicas (producción) que uniformice los indicadores de eficiencia energética, separándolos de los factores estructurales, lo cual permite comparar tanto las eficiencias como los potenciales de ahorro de energía en el tiempo y entre países. Esta metodología ha sido desarrollada por el grupo de Estudios Internacionales del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LNLB) para las ramas industriales intensivas en el uso de energía.

Para el desarrollo de esta tesis, que tiene como objetivo analizar una de las ramas más intensivas en el uso de energía en México, como la industria de la celulosa y el papel se aplica la metodología del LNLB, debido a que el uso de indicadores físicos proporciona una visión más clara de las diferencias técnicas en este sector y los diversos países,

además de permitir una comparación del potencial de mejoramiento de eficiencia energética entre varios países de acuerdo a sus propias estructuras de producción.

De acuerdo con Ozawa,<sup>24</sup> este análisis también permite determinar qué industrias tienen el mayor potencial de eficiencia energética y de reducción de emisiones de carbono a un menor costo, lo que ayuda a elaborar políticas nacionales e internacionales y darles seguimiento.

Al respecto cabe comentar que los productores de papel tienen como interés principal ser más competitivos en costos y calidad a escala global, por lo que los cambios tecnológicos que propicien mayor eficiencia energética y mejoras ambientales estarán basados en aquellos que satisfagan dicho interés.

### **2.1 Metodología del análisis de descomposición.**

En este inciso se describe la metodología de análisis de descomposición que se empleará en el capítulo 3 para analizar el consumo de energía en la industria de la celulosa y el papel.

Para comprender las variables que influyen en la demanda de energía de un país, sector o sub-rama, Schipper y Meyer<sup>25</sup> proponen la metodología del análisis de descomposición en la cual sugieren que el consumo de energía está determinado principalmente por 3 factores:

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

La metodología de análisis de descomposición explica los cambios del consumo de energía considerando que sólo uno de los factores varía, mientras que los otros se mantienen constantes. Esta metodología ha sido utilizada ampliamente para explicar la

---

<sup>23</sup> Ozawa, L., 2000, "Análisis del consumo de energía en el sector industrial mexicano y comparaciones internacionales: industrias siderúrgica y cementera". Tesis de Maestría, UNAM, México.

<sup>24</sup> Ozawa, L. 2000, *Op. Cit.*

<sup>25</sup> Schipper, L., and Meyers, S., with Howard, R. B. and Steiner, R., 1992, *Energy efficiency and human activity: past trends, future prospects*, Cambridge University Press, Cambridge.

contribución de los cambios económicos y de los cambios de la intensidad energética en el consumo de energía de un sector.<sup>26</sup>

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

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

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

$$P_T = \sum P_{it} \quad (2.1)$$

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

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

$$S_{it} = \frac{P_{it}}{P_T} \quad (2.2)$$

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

La intensidad energética ( $I$ ) es utilizada como el indicador de eficiencia energética y se define como la cantidad de energía necesaria por unidad de valor agregado en el sector industrial (ecuación 2.3).

$$I = \frac{E_{it}}{P_{it}} \quad (2.3)$$

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

En este indicador, la definición del numerador depende del objetivo del análisis y de la disponibilidad de los datos. Así, el consumo de energía puede estar definido como: energía útil, energía por usos finales, energía final, energía neta disponible, energía

<sup>26</sup>Ang, B.W., 1995, "Decomposition methodology in industrial energy demand analysis" en *Energy*, vol. 20, no. 11, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 1081-1095.

comprada o demanda de energía primaria, éstas definiciones se describen en el glosario de términos de esta tesis.

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

$$E_t = P_{Ti} \sum S_{it} I_{it} \quad (2.4)$$

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

$$\Delta E = E_T - E_0 \quad (2.5)$$

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

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_P + \Delta E_S + \Delta E_I + \text{residuales} \quad (2.6)$$

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

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

Existen varios métodos de descomposición para calcular la manera en que estos efectos influyen en los cambios del consumo de energía. Es importante mencionar que los resultados son dependientes del método empleado. Los principales criterios de selección del método son: aquel con el cual se obtenga el menor residuo y aquel que tenga una mayor facilidad para realizar los cálculos de acuerdo a los datos disponibles.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091.

De acuerdo con Ang,<sup>28</sup> las fórmulas generales para calcular los efectos que influyen en el consumo de energía empleando la técnica aditiva para el método paramétrico 2 de Divisia (PDM2) son:

$$\Delta E_{P_{t,0}} = (P_t - P_0) \sum_i [S_{i0} \cdot I_{i0} + \alpha (S_{it} I_{it} - S_{i0} I_{i0})] \quad (2.7)$$

$$\Delta E_{S_{t,0}} = \sum_i (S_{it} - S_{i0}) [I_{i0} P_0 + \beta (I_{it} P_t - I_{i0} P_0)] \quad (2.8)$$

$$\Delta E_{I_{t,0}} = \sum_i (I_{it} - I_{i0}) [P_0 S_{i0} + \tau (P_t S_{it} - P_0 S_{i0})] \quad (2.9)$$

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

Con los datos disponibles y conforme a la clasificación de Ang, se eligieron los índices del promedio simple (AVE-PDM2) para analizar el consumo de energía y la intensidad energética de la industria de la celulosa y el papel mexicana. Debido a que la aproximación del promedio simple (AVE-PDM2) evalúa los efectos de manera simétrica del periodo estudiado donde el valor de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\tau$  es igual a 0.5, esto permite obtener resultados que no tengan tendencias del inicio o final del periodo de análisis.

Si el consumo de energía del sector industrial se analiza en periodos largos o si la producción crece de manera acelerada, el efecto debido a la producción será mucho mayor a los efectos estructurales y de intensidad energética. En estos casos se recomienda utilizar la aproximación del análisis de la intensidad energética, la cual considera únicamente los cambios estructurales en la producción y los cambios en la intensidad energética de cada rama industrial. Las fórmulas son análogas a las utilizadas en la aproximación del análisis del consumo energético.<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1088.

<sup>29</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091.

$$\Delta I = \Delta I_S + \Delta I_I + \text{residuales} \quad (2.10)$$

$$\Delta I_{S,t,0} = \sum_i (S_{it} - S_{i0}) [I_{i0} + \beta(I_{it} - I_{i0})] \quad (2.11)$$

$$\Delta I_{I,t,0} = \sum_i (I_{it} - I_{i0}) [S_{i0} + \tau(S_{it} - S_{i0})] \quad (2.12)$$

Dependiendo de la disponibilidad de datos, los cambios en el consumo de energía o en la intensidad energética se pueden analizar en un periodo o a través de una serie de tiempo. El análisis de un periodo es más sencillo porque se requieren menos datos y da una idea de las causas de estos cambios. Sin embargo, se prefiere un análisis de serie de tiempo, ya que permite observar la evolución de los efectos de las variables en el tiempo, el efecto residual es menor y los resultados de este análisis son menos dependientes del método empleado. Este tipo de análisis estima el cambio en el consumo de energía o en la intensidad energética año con año rotando el año base, y el efecto entre el año final y el inicial se calcula como la suma de los cambios de cada año.<sup>30</sup>

$$\Delta E_{t,T} = \sum_{t=1}^{T-1} E_{A,t,t+1} + \sum_{t=1}^{T-1} E_{S,t,t+1} + \sum_{t=1}^{T-1} E_{I,t,t+1} + \sum_{t=1}^{T-1} \text{residuales}_{S_{t,t+1}} \quad (2.13)$$

$$\Delta I_{t,T} = \sum_{t=1}^{T-1} I_{S,t,t+1} + \sum_{t=1}^{T-1} I_{I,t,t+1} + \sum_{t=1}^{T-1} \text{residuales}_{S_{t,t+1}} \quad (2.14)$$

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

Observando esto, la metodología de comparaciones internacionales se desarrolló principalmente para las industrias más intensivas, y emplea indicadores físicos, ya que éstos proporcionan una visión más clara de las diferencias técnicas entre los distintos

<sup>30</sup> Farla, J., et.al., 1995, "Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using physical production data", en *Energy policy*, vol. 25, no. 7-9, p. 746.

sectores y los diversos países; además permite comparar el potencial de mejoramiento de eficiencia energética entre varios países de acuerdo a sus propias estructuras de producción.

Es importante comentar que si se aplica la metodología usando indicadores económicos se debe tener en cuenta algunas consideraciones al respecto, debido a que esta tesis se hace el análisis en base a indicadores físicos no se comentan, si el lector se encuentra interesado en el uso de indicadores económicos se recomienda revisar a Phylpsen, et. al., 1998.<sup>31</sup>

## 2.2 Cálculo de las emisiones de bióxido de carbono para el sector industrial.

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

Para el cálculo de las emisiones de bióxido de carbono (expresados en toneladas de carbono) se emplearon los factores de emisión propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) de acuerdo a los combustibles utilizados que se presentan en la tabla 2.1.

Las emisiones de carbono de estos combustibles se calculan como:

$$Em = \sum_{ij} E_{ij} FEC_j \quad (2.15)$$

donde i se refiere a las diferentes ramas industriales (cuando se hace el cálculo para una rama este índice se omite

j = a los diferentes combustibles

E = al consumo de energía en [PJ]

FEC = al factor de emisión de carbono de cada combustible en [ton de C/PJ]

<sup>31</sup> Phylpsen, et. al., 1998, Handbook on International Comparisons of Energy Efficiency in the Manufacturing Industry, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad de Utrecht, Utrecht, Holanda, p.13 y 14.

**Tabla 2.1 Factores de emisión de carbono para combustibles fósiles y biomasa sólida**

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

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

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

$$FEC_{elect,t} = \sum_i \left( \frac{C_{i,t}}{PE_t} \right) * FEC_{i,t} \tag{2.16}$$

donde i se refiere al combustible utilizado

- $C_i$  se refiere al consumo total del combustible i empleado para generar electricidad en las plantas generadoras del país en el año t en [PJ]
- $FEC_i$  es el factor de emisión de carbono del combustible i en [ton de C/PJ]
- PE se refiere a la producción neta de electricidad de todas las plantas generadoras del país en el año t en [PJ], tomando en cuenta las pérdidas de transmisión y distribución

De esta forma se calcularon los factores de emisión de carbono para la generación de electricidad para México de 1970 a 1995, los cuales se muestran en el Anexo 1.

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

$$Em_t = P_{T,t} S_{i,t} I_{i,j,t} \left[ FEC_{i,j,t} \left( \frac{E_{i,j,t}}{E_{j,t}} \right) \right] \tag{2.17}$$

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

- i se refiere a cada rama industrial
- Em se refiere a las emisiones de carbono para el año t
- P se refiere a la producción de cada sector industrial
- $FEC * (E_{ij}/E_i)$  se refiere al factor de emisión para el combustible j de la rama industrial i considerando la participación del combustible j en la energía total de la rama i

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

$$\Delta Em = \Delta Em_A + \Delta Em_S + \Delta Em_I + \Delta Em_{FEC \frac{E_{ij}}{E_i}} + \text{residuales} \quad 2.18$$

Sin embargo, de manera similar a lo que sucede en el análisis del consumo de energía para periodos muy largos o cuando la producción crece de manera acelerada, es mejor utilizar un análisis de las emisiones específicas (intensidad de emisiones de carbono) en lugar de las emisiones totales para entender como influyen los efectos de la estructura, de la intensidad energética y de los factores de emisión (ecuaciones 2.19 y 2.20).

$$\left( \frac{Em}{P} \right)_{i,j} = \sum_{i,j} S_{i,t} \cdot I_{i,j,t} \left[ FEC_{i,j,t} \left( \frac{E_{i,j,t}}{E_{i,t}} \right) \right] \quad 2.19$$

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right) = \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_S + \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_I + \Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_{FEC \frac{E_{ij}}{E_i}} + \text{residuales} \quad 2.20$$

donde cada uno de los efectos se calcula como:

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_S = \sum_{i,j} (S_{i,t} - S_{i,0}) \left[ I_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) + \beta \left( I_{i,t} \cdot \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - I_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \right] \quad 2.21$$

$$\Delta \left( \frac{Em}{P} \right)_I = \sum_{i,j} (I_{i,t} - I_{i,0}) \left[ S_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) + \tau \left( S_{i,t} \cdot \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - S_{i,0} \cdot \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \right] \quad 2.22$$

Es importante mencionar que el efecto de las variaciones en los factores de emisión y la mezcla de combustibles, suponiendo que los demás factores que influyen en estas emisiones se conservan constantes, refleja principalmente el efecto de la manera en que

se produjo la electricidad empleada en este sector y la sustitución de combustibles en cada rama industrial.

$$\Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{\left(FEC \cdot \frac{E_j}{E_T}\right)} = \sum_{i,j} \left( \left( FEC_{j,t} \cdot \frac{E_{j,t}}{E_{T,t}} \right) - \left( FEC_{j,0} \cdot \frac{E_{j,0}}{E_{T,0}} \right) \right) \left[ S_{i,0} \cdot I_{i,0} + \gamma (S_{i,t} \cdot I_{i,t} - S_{i,0} \cdot I_{i,0}) \right] \quad 2.23$$

De manera similar al análisis del consumo de energía y de intensidad energética descritas anteriormente, las consideraciones de los parámetros  $\beta$ ,  $\tau$  y  $\gamma$  dependen de la disponibilidad de datos y del método seleccionado para el análisis. Además, si se cuenta con datos para una serie de tiempo, se pueden medir los cambios en las emisiones específicas de carbono año con año rotando el año base, y conocer el efecto total de los cambios entre el año final y el inicial como en la ecuación 2.14.<sup>32</sup>

$$\Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{i,T} = \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{i,t+1(S)} + \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{i,t+1(I)} + \sum_{t=0}^{T-1} \Delta\left(\frac{Em}{P}\right)_{i,t+1(FEC \cdot \frac{E_j}{E_T})} + \sum_{t=0}^{T-1} \text{residuales}_{i,t+1} \quad 2.24$$

### 2.3 Metodología de comparaciones internacionales.

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

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

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

La metodología de comparaciones internacionales analiza las industrias más intensivas en el uso de la energía y determina uno o varios factores estructurales que influyen sobre cada una de estas industrias así como algunos factores explicativos que aportan

<sup>32</sup> Ozawa, L., 2000, *Op. cit.*

información adicional para comprender mejor las diferencias entre los distintos niveles de eficiencia energética, tal como la penetración de nuevas tecnologías.<sup>33</sup>

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

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

El indicador de eficiencia energética por excelencia es el consumo específico de energía (CEE) que se define como la cantidad de energía (como entalpía) necesaria para realizar una actividad específica.<sup>34</sup> El CEE de una rama industrial está influenciado principalmente por tres factores: el tipo de productos fabricados, el tipo de procesos empleados (que en buena medida dependen del tipo de materias primas utilizados, como es el caso de la chatarra y el papel reciclado) y la eficiencia energética de los procesos. Siendo la eficiencia energética el factor que puede ser mejorado.<sup>35</sup>

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

La estructura de una rama industrial se puede definir de dos maneras: como la combinación de actividades o como la combinación de productos. La diferencia en estas definiciones puede ejemplificarse con la industria de la celulosa y el papel. Si la estructura se define como la combinación de actividades, ésta es diferente si el proceso de producción de pulpa es mecánico, químico u otro; mientras que si la estructura se define como la combinación de productos, lo importante es conocer la participación de los productos intermedios (celulosa virgen o fibra secundaria) o finales en la producción total (los diferentes tipos de papel: periódico, impresión, entre otros) y la eficiencia en la producción de cada uno de ellos. En la primera definición, un alto consumo de energía se

<sup>33</sup> Phylipsen, G.J.M., et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 14.

<sup>34</sup> Worrell, E., 1996, *Potentials for Improved Use of Industrial Energy and Materials*, tesis doctoral, Departamento de Sociedad, Ciencia y Tecnología, Universidad de Utrecht, Holanda, p. 12.

<sup>35</sup> Worrell, E., 1996, *Op. cit.*, p. 11-14.

explicaría a través de las diferencias en la estructura del sector, mientras que en la segunda a través de su eficiencia energética.

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

Finalmente, el potencial técnico de eficiencia energética se obtiene al confrontar el CEE real, de cierta rama industrial en un país respecto a un CEE óptimo de acuerdo a la mejor tecnología en uso actualmente. El CEE óptimo es calculado como resultado de la combinación ideal de las opciones tecnológicas más eficientes para la producción de una rama industrial.<sup>36</sup>

#### **2.4 Niveles de agregación en la metodología de comparaciones internacionales en la industria de la celulosa y el papel.**

Los indicadores de actividad, estructura y eficiencia energética se definen de acuerdo al nivel de agregación del estudio:<sup>37</sup>

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

<sup>36</sup> Ozawa, L., 2000, *Op. cit.*

Mientras más agregado es el nivel de estudio, se tienen más factores estructurales. A medida que el nivel es menos agregado, aumentan los indicadores que permiten entender los factores que determinan el consumo de energía.

Para el sector celulósico papelerero se tienen principalmente dos niveles de agregación, los cuales se describen a continuación.

#### 2.4.1 Nivel agregado

El nivel agregado se refiere al nivel de una rama industrial. En este nivel se recomienda utilizar el consumo de energía neta disponible que incluya el consumo de todos los procesos involucrados en esa rama industrial. Debido a que una rama industrial generalmente emplea varios procesos en paralelo para la fabricación de un producto, y cada uno de ellos tiene un consumo específico particular, el CEE compuesto para toda la rama se determina a través de la siguiente fórmula.<sup>38</sup>

$$CEE = \sum_{k=1}^{k=n} CEE_k \cdot \frac{P_k}{P} \quad 2.25$$

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

- $CEE_k$  es el consumo específico de energía del proceso k (cada proceso k debe tener definidos tanto el tipo de materia prima empleada como el tipo de producto manufacturado) en GJ/ton
- $P_k$  es el volumen de producción del producto k, medido en toneladas
- $P$  es el volumen total de producción de toda la rama industrial, también medido en toneladas

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

<sup>37</sup> Phylipsen, D.J., et.al., 1998, *Op. cit.*, p. 19.

<sup>38</sup> Worrell, E., 1996, *Op. cit.*, p. 27.

$$CEE_p = CEE_{c,k} + \frac{CEE_{e,k}}{\eta_e} \quad 2.26$$

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

- $CEE_{c,p}$  es el CEE del combustible por producto asociado con cierto proceso industrial k (GJ/ton)
- $CEE_{e,p}$  es el CEE de electricidad por producto asociado con cierto proceso industrial k (GJ/ton)
- $\eta_e$  es la eficiencia promedio de las plantas generadoras de electricidad del país analizado.<sup>39</sup>

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

En el caso de no disponer de los datos del consumo de energía neta disponible,<sup>40</sup> se puede emplear el consumo de energía final y considerar el nivel de penetración de la cogeneración como un factor explicativo.<sup>41</sup>

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

#### 2.4.2 El nivel desagregado

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

<sup>39</sup> La eficiencia de generación de electricidad se calculó como:

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

<sup>40</sup> Es la cantidad de energía actualmente disponible por el usuario.

<sup>41</sup> Philipsen, G.J.M., et. al, 1998, *Op. cit.*, p. 39.

El CEE desagregado se determina para un proceso o producto específico, por ejemplo, el CEE para elaboración de pulpa (mecánica, química y otras), el CEE para el secado de pulpa, el CEE la preparación de fibra secundaria y el CEE para la elaboración de papel (periódico, empaque, etc.).

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

Algunos aspectos que vale la pena comentar son, que en el caso de industrias integradas (ver sección 1.3) el secado de pulpa puede ser omitido; para el caso de la fibra secundaria el consumo de energía por transporte no es considerado; y en la fabricación de papel el consumo de energía de refinación y secado debe incluirse para el cálculo del CCE de igual forma se debe incluir el consumo de energía por corte y enrollado.

Ambos niveles de agregación son mostrados en la figura 2.1, que indica los indicadores físicos de eficiencia para la producción de pulpa y papel.

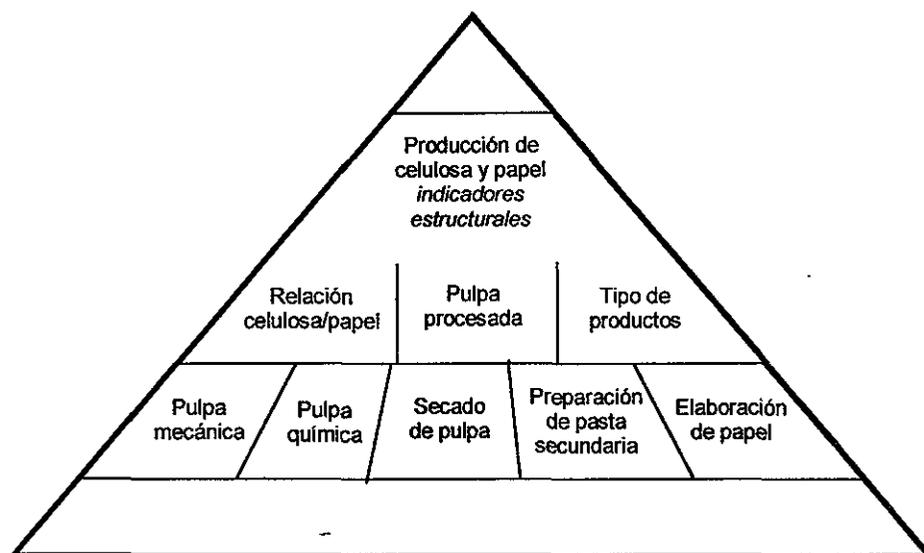
El nivel más alto de la pirámide indica que se requiere la información de producción de celulosa y de papel. El cálculo de CCE en este nivel para la producción de celulosa y papel, (usando indicadores físicos), se obtiene primero dividiendo sectorialmente el consumo (como energía neta disponible, haciendo la distinción entre energía eléctrica y de combustibles) y segundo dividiendo cada uno de los consumos entre la producción total de papel. En el caso de que se use madera de desecho u otras fuentes de energía también deben estar contabilizadas.

El nivel medio de la pirámide indica los factores estructurales, el primer cuadro indica el factor relacionado con la participación de pulpa virgen y se encuentra definido por la relación de pulpa virgen entre la producción de papel, el siguiente factor esta relacionado con los procesos intermedios previos a la producción de papel, en este punto es deseable conocer la eficiencia por planta (GJ/ton); el último factor esta relacionado con los diferentes tipos de productos, es decir, los diferentes tipos de papeles producidos (papel impresión, periódico, sanitario, etc.).

El nivel más bajo de la pirámide (que es el nivel más desagregado), indica la eficiencia por unidad de operación; en los dos primeros cuadros se relaciona la energía requerida por tipo de pulpa (mecánica, química ú otra, en GJ/ ton) por tonelada de producción; los dos

cuadros siguientes relacionan el consumo de energía en el secado de pulpa y preparación de la pasta secundaria en GJ/ ton; por último el consumo de energía en la elaboración de cada tipo de papel en GJ/ton.

**Figura 2.1 Pirámide de indicadores de eficiencia para la producción de celulosa y papel**



Fuente: Phylipsen, D., et. al., 1998, Manual de comparaciones internacionales de eficiencia energética en el sector industrial, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad, Universidad de Utrecht, Utrecht, Holanda, p. 121.

También la comercialización de pulpa entre países es un factor estructural que afecta el consumo energético; en el caso de México la participación de fibra secundaria se ha incrementado considerablemente en los últimos años (ver gráfica 1.5), que en su mayoría depende del exterior.

**2.4.3 Nivel de eficiencia energética**

Como se mencionó anteriormente esta tesis pretende explicar que el mejoramiento de la eficiencia energética de un proceso industrial significa reducir el CEE de un proceso o de la rama industrial analizada lo cual implica evaluar el efecto total de todas las medidas de mejoramiento de eficiencia energética implantadas en ese proceso o rama industrial.

Para ello se consideró lo expuesto por Ozawa: "Con base en la metodología de comparaciones internacionales, el potencial técnico de eficiencia energética se calcula comparando el CEE actual de una industria, tomando en cuenta sus factores

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

estructurales, respecto a un CEE óptimo de referencia para la industria analizada. Este CEE óptimo se refiere al CEE mínimo observado en una rama industrial o en una planta en el mundo al emplear la mejor tecnología disponible para un año determinado. En principio todas las plantas de dicha rama industrial podrían alcanzar este nivel de eficiencia energética óptimo por lo que es importante considerarlo como punto de referencia".<sup>42</sup>

Este punto de referencia es determinado de acuerdo al objetivo del análisis para reducir el CEE y del nivel de eficiencia energética que se desee alcanzar. Así, el CEE óptimo puede definirse de acuerdo con Philipsen, D.,<sup>43</sup> como:

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

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

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

$$CEE_{mp} = \sum_{k=1}^{k=n} CEE_{mp,k} \cdot \frac{P_k}{P_T} \quad 2.27$$

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

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

<sup>42</sup> Ozawa, L., 2000, *Op. cit.*

<sup>43</sup> Philipsen, D., G. J. M., et. al., 1998, *Op. cit.*

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

Para establecer el potencial de eficiencia energética de diferentes países y realizar una comparación entre ellos es necesario tomar en cuenta los efectos estructurales que influyen en cada país; ya que para cada rama industrial el CEE actual y el CEE de referencia se calculan y se representan gráficamente como una función que depende de uno o varios factores estructurales.<sup>44</sup>

Para ejemplificar esto en la industria de la celulosa y el papel, consideramos los siguientes aspectos:

1. La proporción de fibra virgen es el factor estructural, que tiene una relación directa con el consumo de energía en esta industria
2. Suponemos el caso hipotético de analizar la industria de la celulosa y papel para cuatro países diferentes (llamados A, B, C y D)
3. El CEE se describe como función de la relación entre el consumo de pulpa virgen y la producción de papel, esta relación es diferente para cada país; de igual forma el consumo de fibra secundaria es diferente en cada caso, también el patrón de importaciones/exportaciones es distinto en cada país
4. El valor actual de CEE de los cuatro países se compara con el  $CEE_{mp}$  de esta industria que también es función de la relación pulpa virgen-papel
5. Hacemos la representación gráfica, en donde la variable independiente que es el factor estructural se coloca en el eje de las abscisas y la variable dependiente que es el CEE se coloca en el eje de las ordenadas, como se muestra en la gráfica 2.1

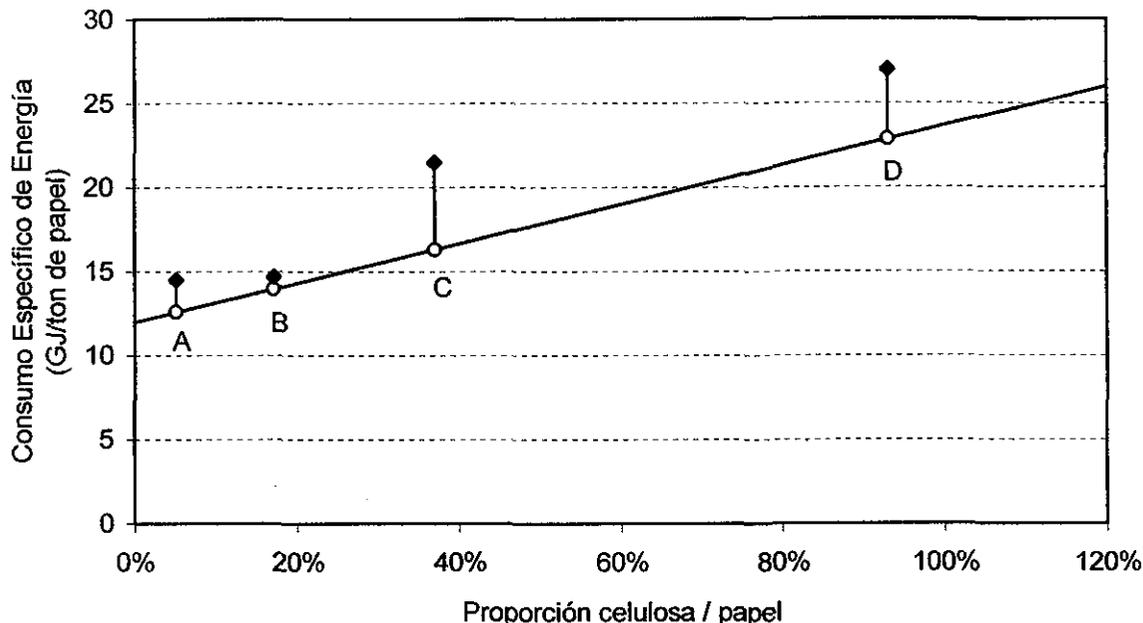
De acuerdo con la explicación de Phylipsen, D, tenemos que:

Los puntos superiores  $\blacklozenge$  representan el CEE actual y los puntos inferiores  $\square$  el CEE de referencia para cada país. Como se observa, la diferencia entre el CEE actual y el CEE de referencia es una medida del potencial técnico de eficiencia energética para cada país de acuerdo a su estructura, y la diferencia relativa entre países permite su comparabilidad.<sup>45</sup>

<sup>44</sup> Phylipsen, D., et. al., 1998, *Op. cit.*, p 37.

<sup>45</sup> Phylipsen, D., et. al., 1998, *Op. cit.*, p. 37.

**Gráfica 2.1 Estructura / eficiencia en la industria de la celulosa y el papel**



Fuente: Phylipsen, D., 2000, "International Comparisons & National Commitments, p. 109.

Como se observa en la gráfica 2.1, si solo se hace la comparación de CEE para cada país A y B son prácticamente iguales, mientras que C tiene un mayor CEE, y D es el país con mayor CEE de los cuatro países analizados, ahora bien si se hace la comparación a través del factor estructural los países A y D tienen un potencial de ahorro muy similar, B tiene el menor potencial de ahorro y C es el país con mayor potencial de ahorro.

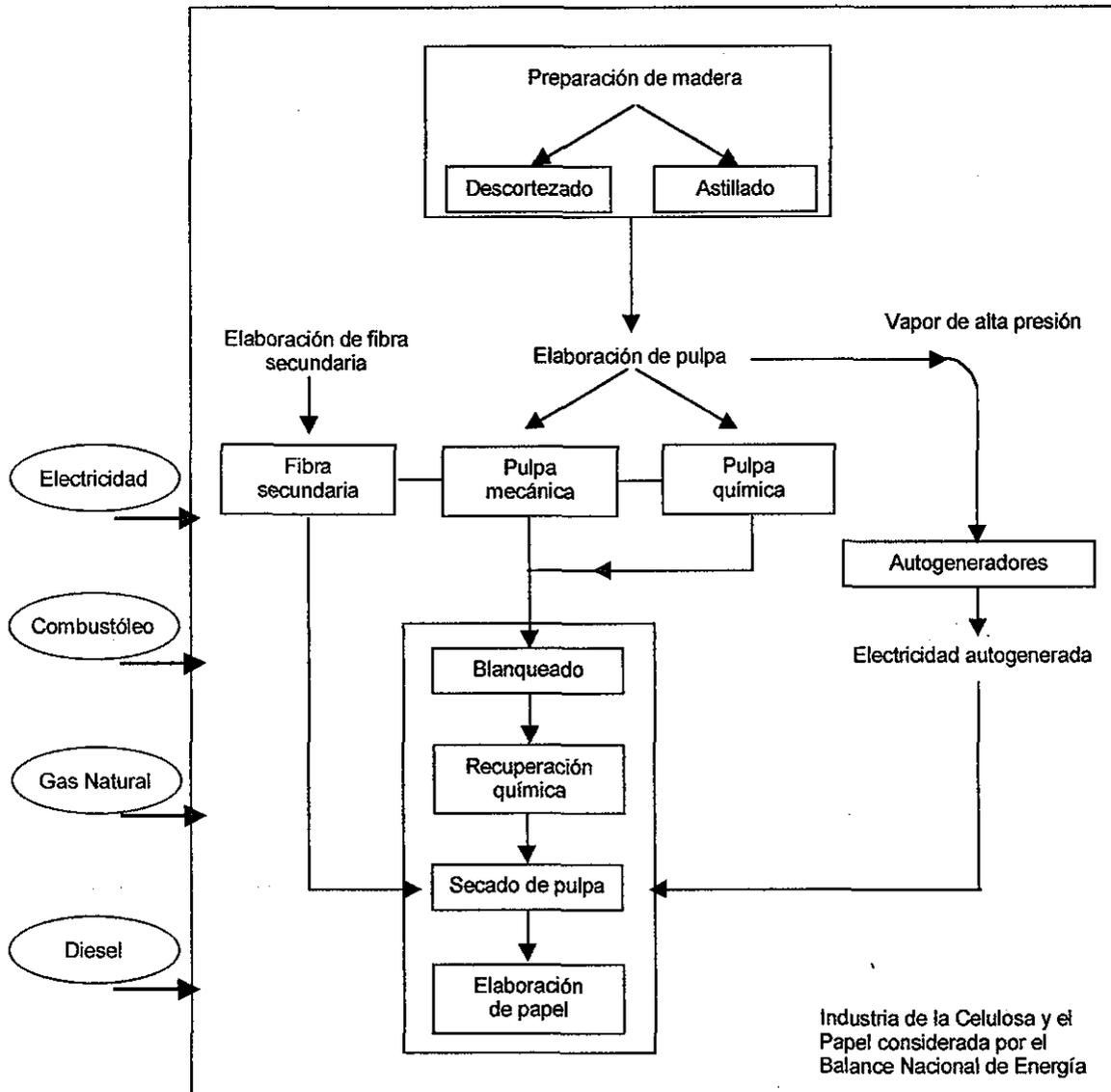
En resumen no es suficiente con hacer el comparativo de CEE entre países, se requiere además hacer el comparativo, considerando el factor estructural de cada país.

### 2.5 Fronteras del sistema para la industria de la celulosa y el papel.

De acuerdo con la recomendación de la metodología de comparaciones internacionales debe existir claridad en la definición de las fronteras del sistema, en el caso de la industria de la celulosa y el papel se detallan las fronteras del sistema energético consideradas por el Balance Nacional de Energía (BNE), estas fronteras son mostradas en la figura 2.2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Figura 2.2 Fronteras del sistema energético de la industria de la celulosa y el papel de acuerdo al Balance Nacional de Energía**



Fuente: Elaboración propia.

En el capítulo 1 se describieron los procesos de fabricación del papel que se divide en dos etapas: la elaboración de la celulosa y la elaboración del papel.

En México los principales procesos empleados para la obtención de pulpa virgen son: mecánico, químico de madera y químico de plantas anuales; en tanto la producción de fibra secundaria involucra básicamente la depuración de la pulpa, aunque en el caso de México la mayor parte de fibra secundaria es importada principalmente de Estados Unidos.

Una vez que se tiene la materia prima el siguiente paso es la elaboración de papel; se puede decir que la manufactura de papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, las cuales se basan en la tendencia de las fibras celulósicas en suspensión acuosa a unirse entre sí cuando se secan. El proceso de la elaboración se lleva a cabo en dos grandes áreas, la primera se refiere a la preparación de pastas, mientras que la segunda atañe a la formación del papel propiamente dicha.

Durante cada una de las etapas de elaboración tanto de la celulosa como del papel se requiere de energía eléctrica en tanto que los combustibles demandados son diferentes dependiendo del proceso, durante la elaboración de las pulpas químicas el combustible generalmente usado es el combustóleo, mientras que para el secado, tanto de celulosa como de papel normalmente se usa gas natural o diesel.

Los indicadores empleados para la industria de la celulosa y el papel se calculan con base en la energía comprada como se reporta en el BNE. En la figura 2.2 se presentan el esquema de consumo de energía de esta industria. Los procesos de transformación se encuentran encerrados en rectángulos, mientras que los combustibles están encerrados en círculos.

## **2.6 Descripción de la metodología del análisis de descomposición basado en unidades físicas para la industria de la celulosa y el papel.**

Para entender los factores que influyen en el consumo de energía de la industria mexicana de la celulosa y el papel se utilizó el método propuesto por Farla.<sup>46</sup> El consumo de energía de esta industria es función de la producción (actividad), la composición de su producción y el tipo de procesos empleados en esta industria (estructura) y la eficiencia energética en los procesos de producción.

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

<sup>46</sup> Farla, J., et. al., 1995, *Op. cit.*, p. 746.

productos celulósico-papeleros se calcule un promedio ponderado que considere un factor de peso para cada producto celulósico-papelero.<sup>47</sup> A este promedio se le conoce como índice de producción física (IPF).

$$IPF = \sum_{i=1}^n P_i \cdot CEE_{BPi} \quad 2.28$$

En el caso de la industria de la celulosa y el papel los factores de ponderación se fundamentan en la energía consumida utilizando la “mejor práctica” existente para producir cada producto celulósico y papelero.

Los diferentes productos de la celulosa y el papel considerados son: pulpa mecánica, pulpa química y otras pulpas; papel periódico, escritura e impresión, empaque, sanitarios y faciales y otros papeles. En la tabla 2.2 se presentan los consumos específicos de la “mejor práctica” para fabricar estos productos, la descripción de como se obtuvieron estos valores se encuentra en el Anexo 2.

De acuerdo a la ecuación 2.4 y empleando la definición del IPF, el consumo de energía en la industria de la celulosa y el papel se calcula de la siguiente manera:

$$\sum E = \sum P \cdot \frac{IPF}{\sum P} \cdot \frac{\sum E}{IPF} \quad 2.29$$

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

Debido a la disponibilidad de datos, se analizó el consumo energético de la industria mexicana de la celulosa y el papel de 1970 a 1999 empleando las aproximaciones mencionadas en el inciso 2.1. Sin embargo, debido a que la producción de papel aumentó y el periodo de estudio es largo, la influencia del efecto del parámetro de actividad resultó mayor que los otros efectos lo que no permitió analizar adecuadamente los efectos estructurales y de eficiencia energética. Por lo tanto se empleó la aproximación del consumo específico de energía de acuerdo a las definiciones de estructura y eficiencia energética descritas en la ecuación 2.29 y se examinaron las influencias de los cambios en estas dos variables en el periodo estudiado conforme a las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12 y 2.14.

<sup>47</sup> Worrell, E., et. al., 1997, *Op. cit.*, p. 733.

**Tabla 2.2 Consumos específicos de energía para las mejores prácticas en varios procesos y productos de la industria de la celulosa y el papel**

Proceso		Energía primaria (GJ <sub>p</sub> / ton)	Combustibles (GJ <sub>c</sub> / ton)	Electricidad (GJ <sub>e</sub> / ton)
Celulosa	Mecánica	11.2	-2.1	5.3
	Química	16.3	10.0	2.5
	Otras	12.0	-3.0	6.0
Reciclado		3.9	0.4	1.4
Tipos de papel	Periódico	6.0	2.5	1.4
	Impresión	12.0	7.0	2.0
	Sanitario	11.0	5.0	2.4
	Empaque	8.8	5.0	1.5
	Otros	10.5	6.0	1.8

Fuente: Farla, J., et.al., 1997, "Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using phsysical production data", en *Energy policy*, vol. 25, no. 7-9. p 749.

De acuerdo a la clasificación de Ang<sup>48</sup> se utilizó la técnica aditiva del análisis de la intensidad energética y el método paramétrico de Divisa basado en los índices del promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base para analizar los factores que contribuyeron a disminuir el CEE en la industria mexicana de celulosa y papel debido a su pequeño residuo.

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

$$\left(\frac{Em}{P}\right) = \left(\frac{IPF}{\sum P}\right) \left(\frac{\sum E}{IPF}\right) \left(\sum FEC_j \cdot \frac{E_j}{\sum E}\right) \quad 2.30$$

donde IPF/ΣP es el parámetro de estructura, ΣE/IPF es el parámetro de eficiencia energética y el factor (ΣFEC\*E<sub>j</sub>/ΣE) permite observar los cambios debidos a la sustitución

<sup>48</sup> Ang, B.W., 1995, *Op. cit.*, p. 1091.

de combustibles tanto en la industria de la celulosa y el papel en la generación de electricidad.

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

Una vez descritas las metodologías que se aplicaron durante el análisis de la industria de la celulosa y el papel se requiere mostrar los cambios en la producción (actividad), los cambios en la composición de la producción y el tipo de procesos empleados.

## Conclusiones

La aplicación de las metodologías de índices de cambio y comparaciones internacionales para el análisis de las tendencias de consumo de energía y las emisiones asociadas de bióxido de carbono, permiten entender cuáles son los factores que influyen el cambio en dichas tendencias, sin embargo cuando se cuenta con información poco desagregada es difícil separar con claridad el peso relativo de los factores explicativos.

Para llevar a cabo un análisis que permita establecer con claridad el pesos relativo de estos factores explicativos se requiere aplicar una metodología basada en unidades físicas (GJ/ton producción) más que en unidades económicas (energía por unidad de valor agregado). Sin embargo cuando se lleva a cabo un análisis en unidades físicas se requiere de información desagregada; a través de esta información es posible entender los llamados factores explicativos y tener una visión más clara de las diferencias técnicas en el sector celulósico papelerero y los diversos países.

De acuerdo con la anterior se observó que los factores explicativos para la industria de la celulosa y el papel son: *la producción; los factores estructurales* que como se comentó están relacionados con: el tipo de materia prima (que puede ser fibra virgen o fibra secundaria); el tipo de productos finales (papel periódico, escritura e impresión, empaque, etc.) y *la eficiencia del proceso*.

Estos mismos factores son utilizados en el análisis de descomposición para explicar los cambios en las emisiones de carbono debidas al uso de la energía en el sector celulósico papelerero, pero además se consideran los factores de emisión de carbono que incluyen

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

tanto la participación de los diferentes combustibles en el consumo final total de energía del sector como la generación de electricidad.

Este capítulo contiene la descripción de la herramienta necesaria para el análisis de la industria de la celulosa y el papel y la información que se requiere; en el siguiente capítulo se describen los resultados obtenidos con la aplicación de las metodologías y la información que se logró reunir considerando el periodo de análisis de 1970 a 1999, con ello es posible tener una visión más amplia de los cambios que ha sufrido el sector celulósico papelerero en México y cuáles han sido los principales factores que han influido.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Capítulo 3

### **Cambios en el Consumo de Energía y Emisiones de Carbono en la Industria de la Celulosa y el Papel**

El sector de la elaboración de la pasta y el papel se clasifica dentro de los grandes consumidores de energía; se estima que el consumo mundial de energía primaria durante 1992 fue de 8 EJ.<sup>49</sup> En México la energía que requirió la industria de la celulosa y el papel durante 1999 fue de 49.4 PJ lo que significó un incremento del 6.2% con respecto al año anterior, mientras que la participación correspondiente a esta rama fue de 3.8% en relación con el total del consumo energético industrial.

Entre 1970 a 1999 el consumo de energía primaria de la industria mexicana de la celulosa y el papel se incrementó de 21.72 a 64.7 PJ lo que significó una tasa anual de crecimiento de 3.0%. En lo que respecta al consumo específico de energía primaria (CEE<sub>p</sub>) disminuyó de 1970 a 1999 de 24.21 a 17.04 GJ/ ton papel. Esta reducción en el consumo de energía por unidad de papel, se debió principalmente a cambios estructurales dentro de la industria relacionados con el aumento del uso de fibra secundaria y algunos cambios tecnológicos que participaron en el aumento de la eficiencia energética en su conjunto.

Por otra parte las emisiones de carbono en la industria de la celulosa y el papel mexicana han aumentado en un 357% de 1970 a 1999, esto es de 0.322 a 1.15 millones de toneladas de carbono lo cual significó una tasa anual de crecimiento de 4.5%, las cuales se deben principalmente al uso de combustibles fósiles y de electricidad para la fabricación del papel. El factor que más influye en el incremento de las emisiones así como en el consumo de energía es el notable crecimiento de la producción de papel en estos años.

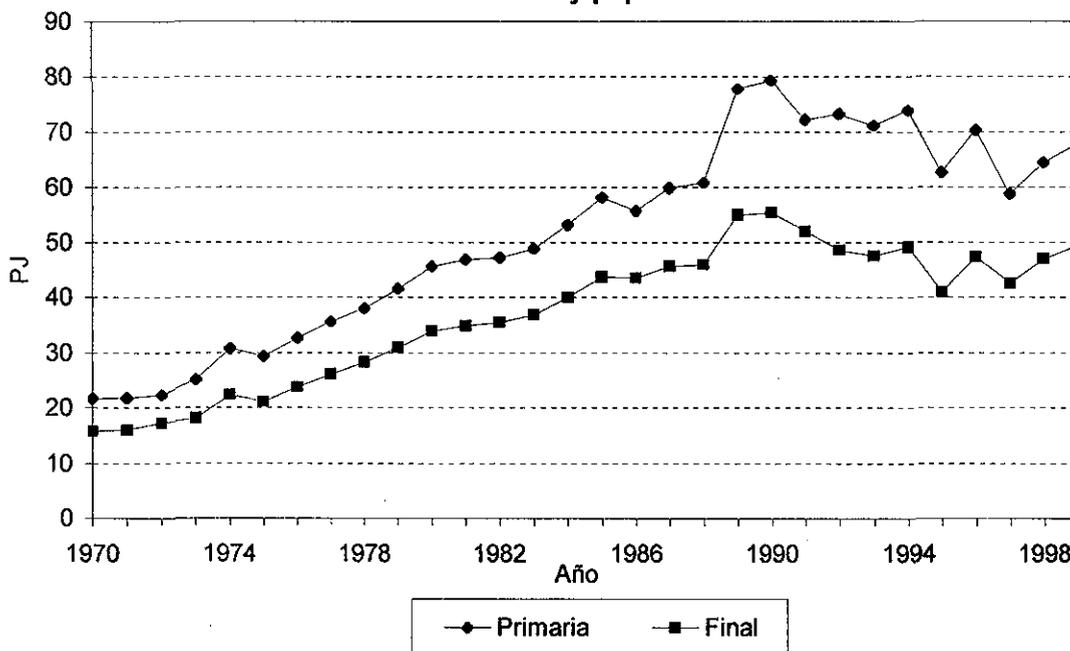
En cuanto a las emisiones específicas de carbono se observó que de 1970 a 1999 presentaron una disminución de 360 a 304 kg de C/ton de papel, lo que significó un 15.6% menos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Entre los factores que favorecieron esta disminución se encuentran el incremento de uso de fibra secundaria y las medidas de eficiencia energética aplicadas en la última década del periodo de análisis.

### 3.1 Consumo de energía en la industria mexicana de la celulosa y el papel.

Entre 1970 y 1999 el consumo final de energía en el sector celulósico papelerero aumentó de 15.81 PJ a 49.38 PJ con una tasa de 4.0% anual de crecimiento para este periodo. Como se mencionó anteriormente la industria de la celulosa y el papel se ubica dentro de las industrias más intensivas en el uso de energía, durante 1999 ocupó el séptimo lugar en el consumo de energía final, lo que significó el 3.8% del consumo final del sector industrial.

La gráfica 3.1 muestra el consumo histórico de energía final, se puede observar la tendencia creciente de 1970 a 1994, sufriendo un ligero decaimiento de 1995 a 1999, este se hizo más notorio durante 1997, que reportó una caída del 10.1% con respecto al año anterior. En la misma gráfica se pueden apreciar los cambios en el consumo de energía primaria de 1970 a 1999 que tuvo una tasa de crecimiento anual de 5.2%, este incremento se debió al incremento de la participación de electricidad dentro de la industria de la celulosa y el papel.

**Gráfica 3.1 México: consumo de energía en la industria de la celulosa y papel**

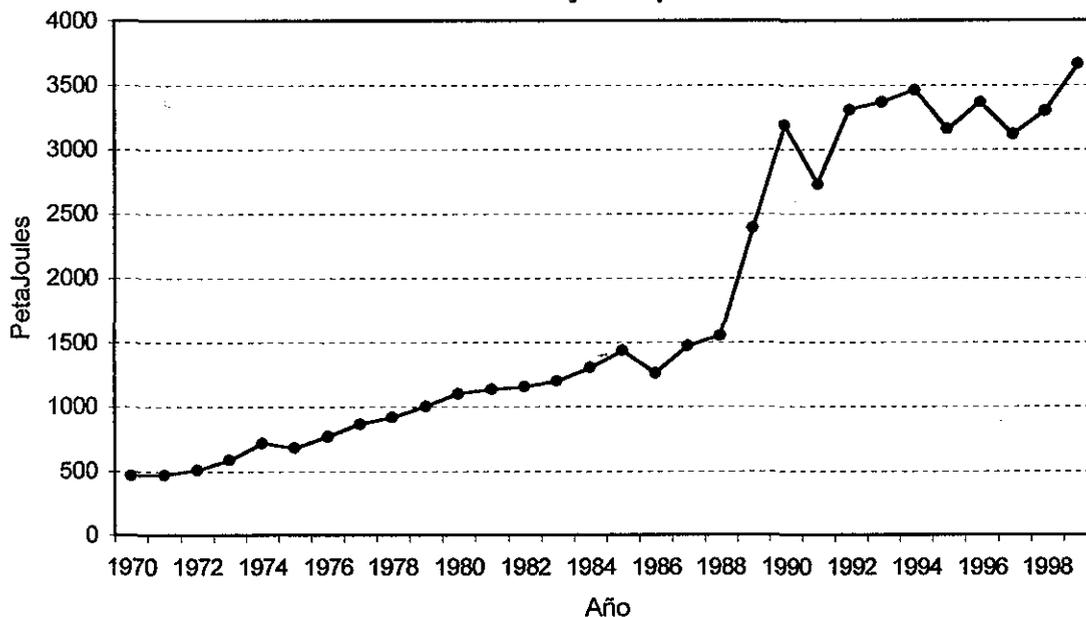


Fuente: SE, Balance Nacional de Energía, varios años.

<sup>49</sup> Farla J, Blok K. and Schipper L, 1997, " Energy efficiency developments in the pulp and paper industry: a cross-country using physical production data " en Energy Policy, vol 25 no 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 745.

El consumo eléctrico se ha incrementado en la industria de la celulosa y el papel, lo que la coloca entre las más intensivas en el uso de la energía eléctrica, el consumo eléctrico de esta industria presentó una tasa anual de crecimiento de 6.4% entre 1970 y 1999 mientras que la intensidad eléctrica, creció de 1.86 GJ/ton papel (518.31 kWh/ton papel) en 1970 a 2.63 GJ/ton papel (996.98 kWh/ton de papel) en 1999, ubicándose con ello entre las ramas industriales con mayor incremento en el consumo eléctrico, tal como lo muestra la gráfica 3.2.

**Gráfica 3.2 México: Consumo de Electricidad de la Industria de la Celulosa y el Papel**



Fuente: S.E., Balance Nacional de Energía varios años.

El consumo de energía y los combustibles empleados en la industria de la celulosa y el papel pueden explicarse a través de los procesos de fabricación utilizados. El combustóleo (fuel oil) y el gas natural son las principales fuentes energéticas de esta industria y básicamente, el uso principal de los combustibles está determinado por los requerimientos de vapor para los procesos de secado y en menor escala para usos varios en la preparación de pastas, en lo que respecta a la electricidad esta es empleada en todas y cada una de las etapas de producción tanto de la celulosa como la de papel. El BNE no reporta el consumo de licor negro, generalmente este energético es utilizado para el autoconsumo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **3.2 Resultados de la aplicación de las metodologías de análisis de descomposición en la industria de la celulosa y el papel mexicana.**

En el capítulo 2 se comentó que para el análisis del consumo de energía en cualquier rama ó sector como en el caso del sector celulósico papelerero, se consideran tres indicadores: la producción (actividad), la composición de su producción y el tipo de proceso empleado (estructura), y la cantidad de energía utilizada para realizar una actividad específica (intensidad energética).

También se dijo que a nivel de rama o sector industrial es preferible el uso de unidades físicas para definir los indicadores antes mencionados y en niveles mas desagregados. En el caso de la industria mexicana de la celulosa y el papel se siguió la recomendación anterior aumentando así los indicadores que permitieron determinar los cambios en el consumo de energía.

Debido a la disponibilidad de datos, se analizó el consumo de energía de la industria nacional de la celulosa y el papel de 1970 a 1999. En la siguientes secciones se describen los cambios más importantes (tanto de producción como en la estructura de producción) en este sector, al mismo tiempo se comenta la influencia que estos cambios han tenido en el consumo de energía.

#### **3.2.1 Actividad**

En el capítulo 1 se comentó que entre 1970 y 1999 la producción nacional de celulosa creció a una tasa anual de 0.5% mientras que la producción de papel creció a una tasa anual de 5.1% para el mismo periodo. De acuerdo con esto, se puede decir que los cambios en la actividad del sector celulósico papelerero en México se deben principalmente al incremento en la producción de papel debido a que la producción de celulosa prácticamente ha permanecido constante.

Al realizar el análisis de descomposición se observó que el nivel de producción del sector celulósico papelerero en México fue el factor que influyó en mayor medida en el consumo de energía. Sin embargo, al realizar el análisis de la influencia de la actividad en algún sector industrial en periodos largos o si la producción crece de manera acelerada, como es el caso de la industria nacional de la celulosa y el papel, la influencia del efecto del parámetro de actividad resulta mayor que los otros efectos, lo que no permite analizar adecuadamente los efectos estructurales y de eficiencia energética.

Debido a lo anterior se emplea la aproximación del análisis de la intensidad energética, la cual considera únicamente los cambios estructurales en la producción y los cambios en la intensidad energética. Estos cambios serán comentados en la sección 3.3, en donde además se explicará más detalladamente los factores explicativos en el cambio de consumo de energía.

### 3.2.2 Estructura

Para el caso de la industria de la celulosa y el papel, la metodología de comparaciones internacionales indica que el Consumo Específico de Energía (CEE) está influido por 3 factores: el tipo de materia prima (que puede ser fibra virgen o fibra secundaria); el tipo de productos finales (papel periódico, escritura e impresión, empaque, etc.) y la eficiencia del proceso.<sup>50</sup> Cabe mencionar que estos factores influyen de forma diferente, dependiendo del país que se este analizando; estos factores pueden contribuir en el incremento o en la disminución del consumo según sea el caso.

En el caso del sector celulósico papelerero en México, el factor estructural que más ha contribuido en la disminución, tanto en el  $CEE_p$  como a evitar un mayor crecimiento en el consumo de energía, es la creciente participación de fibra secundaria (ver gráfica 1.4) en la fabricación de papel, debido a la disminución de producción de fibra virgen, la cual ha sido ocasionada por el alto costo de materias primas para su producción, el mayor costo energético y las cuestiones relacionadas con las Leyes Forestales.

Otro factor estructural que ha contribuido en el incremento en el consumo de energía, pero en menor grado es el relacionado con la estructura de producción. En el caso de la celulosa destaca el incremento de producción de pulpas químicas, (las cuales tienen un mayor  $CEE_p$ , ver tabla 2.2), en tanto que en papel ha crecido la participación de los papeles sanitarios que también tienen un mayor  $CEE_p$ .

En lo que respecta a los productos finales es importante comentar que el consumo de energía depende en gran medida del tipo de papel que se esté elaborando en una planta. En general, los papeles sanitarios y faciales, así como los papeles para escritura e impresión tienen un mayor  $CEE_p$ . Esto se debe a su mayor grado de elaboración, y a que se requiere de celulosas con procesos previos más elaborados, aunque en la actualidad algunos papeles para escritura e impresión se fabrican con 100% de fibras secundarias.

<sup>50</sup> Worrell, E., E. L. Price, Nathan Martin, Jacco Farla and Roberto Schaeffer, 1997, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 730-731.

### 3.2.3 Eficiencia Energética

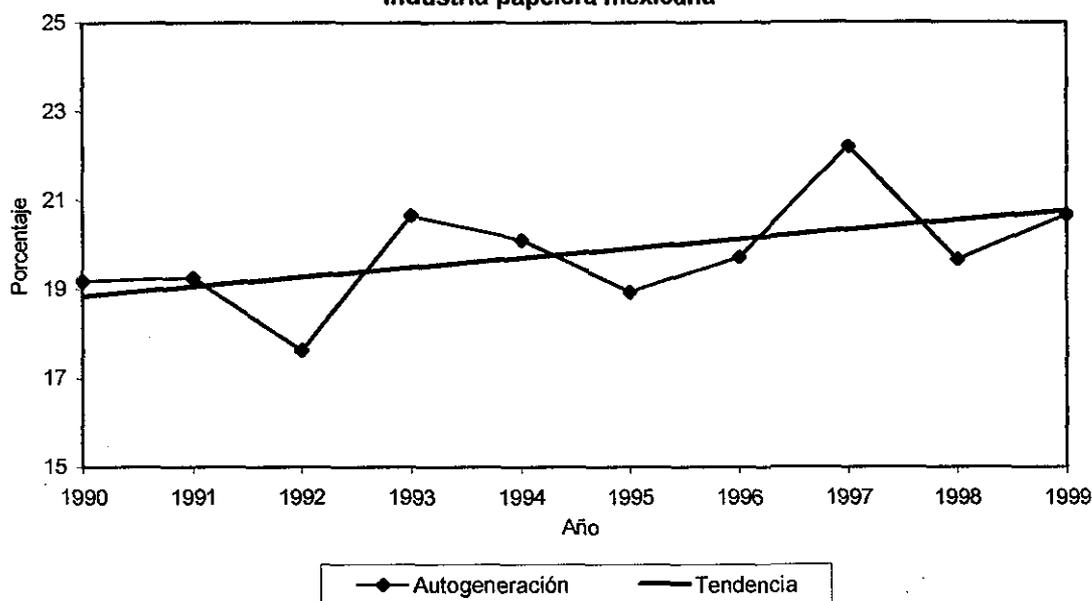
Lo anterior ha ocasionado la selección de nuevos procesos de fabricación, al igual que la ampliación de los procesos de reciclado para el aprovechamiento de mayores cantidades de papel de desecho. Con la introducción de estos nuevos procesos se han dado algunas mejoras en la eficiencia energética.

Entre las mejoras en la eficiencia energética que han contribuido en la disminución del Consumo de Energía primaria ( $CEE_p$ ) se encuentran: mejoras al proceso de elaboración de pulpa (utilización de digestores continuos, mayor recuperación de licor negro, implementaciones en el refinador entre otras); incremento en la capacidad de secado de papel y pulpa; el incremento del empleo de los gases de proceso de pulpa química (y del proceso en general) para la cogeneración de electricidad, la sustitución e implementación de equipos (motores eléctricos, variadores de velocidad, entre otros).

Un aspecto que merece atención especial es la autogeneración eléctrica, en nuestro país el sector celulósico papelerero, tiene uno de los porcentajes más altos en este rubro, de 1990-2000 la energía autogenerada representó alrededor de 20% del consumo total de electricidad del sector. Además, esta participación está creciendo, lentamente y con altibajos, pero con una tendencia clara como se muestra en la gráfica 3.3. Este aumento se puede deber a las facilidades existentes para obtener los permisos necesarios para autogenerar electricidad, así como a que sea económicamente más atractivo generar su propia electricidad que comprarla a la red. Lo que ha propiciado una disminución en la demanda de energía eléctrica, pero que como se mencionó anteriormente ha incrementado el consumo de energía primaria.

Cabe mencionar que de acuerdo con una revisión con los permisos otorgados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) se pudo constatar que la mayor parte de los permisos otorgados bajo la modalidad de autogeneración, en realidad operan con esquemas de cogeneración.

**Gáfica 3.3 México: participación de la autogeneración eléctrica en la industria papelera mexicana**



Fuente: SE, Balance Nacional de Energía, México, varios años.

### 3.3. Análisis de descomposición.

De acuerdo con el análisis realizado, entre 1970 y 1999 el consumo específico de energía primaria ( $CEE_p$ ) en la industria mexicana de la celulosa y el papel disminuyó de 24.25 a 17.04 GJ/ton de papel. Para comprender los factores que influyeron en la disminución del consumo específico de energía, se emplearon las metodologías de análisis de descomposición y de estructura - eficiencia explicadas en el capítulo 2 y se calculó el potencial de ahorro de energía respecto a la mejor práctica en 1999.<sup>51</sup>

Para el análisis de descomposición se empleó la técnica aditiva del análisis de intensidad energética descrita por las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12, pero tomando en cuenta los cambios en la composición de la producción de esta industria a lo largo del tiempo a través del índice de producción física y los factores de ponderación mencionados en la tabla 2.2. Además se estimaron los índices de promedio simple (AVE-PDM2) rotando el año base debido a la disponibilidad de datos y al pequeño residuo resultante.

<sup>51</sup> Debido a que en el análisis de descomposición el efecto actividad, es decir, el efecto debido a la producción de papel resultó mayor que los efectos estructura y eficiencia, se siguió la recomendación de Ang, B. W. de utilizar la aproximación del análisis de intensidad energética.

En un primer análisis se consideraron los índices de cambio que estiman los diferentes factores que influyeron en el incremento del consumo eléctrico de manera aislada, los resultados son mostrados en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 México: Cambios en el consumo específico de energía de la industria de la celulosa y el papel entre 1970 a 1999 y 1990 al 1999.**

	1970-1999 GJ/ton papel	1990-1999 GJ/ton papel
Variación en el CEEp	-7.2	-10.82
Efecto IPF/P (estructura)	-13.95	-6.06
Efecto E/ IPF (eficiencia)	6.75	-4.76

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que si la eficiencia energética se hubiera mantenido constante a los niveles de 1970, el CEEe hubiera disminuido 13.95 GJ/ton de papel debido al factor estructural, por otro lado si la estructura se hubiera mantenido constante a los niveles de 1970, el CEEe se hubiera incrementado 6.75 GJ/ton papel. Entre 1970 a 1999, los cambios estructurales son los que han tenido mayor influencia en la disminución del consumo de energía y tal como se describe a continuación:

El factor estructural relacionado con el uso de fibra secundaria que en 1970 representó el 45.2% del consumo total de fibras y el restante 54.8% correspondió a fibras vírgenes, mientras que en 1999 las fibras secundarias representaron el 78.7% en el consumo total de fibras y el restante 21.3% correspondió a fibras vírgenes. Al mismo tiempo se dieron modificaciones en la composición de los productos finales, por ejemplo, en la actualidad prácticamente todos los papeles de empaque en nuestro país están fabricados con 100% de fibra secundaria de diversas calidades.

Los cambios en la estructura o composición de la producción tanto de pulpa como de papel; en 1970 la producción de pulpas con medios químicos representó el 84.8% del total de la producción, en tanto que el 14% fue producida con medios mecánicos y 1.3% de otras pulpas, para 1999 la estructura de producción fue de 91.1% de pulpas químicas y 8.9% de pulpas mecánicas.

En lo que se refiere a la estructura de producción de papel en 1970 estuvo dada de la siguiente forma: 5.6% de papel periódico, 18.5% de papel escritura e impresión, 65.3% de papel empaque, 6.3% de papel sanitario y 4.2% de otros papeles; en tanto que en 1999

estuvo compuesta de la siguiente manera 6.5% de papel periódico, 18.4% de escritura e impresión, 57.1% de papel empaque, 17.4% de papel sanitario y 0.6% de otros papeles.

Para el periodo comprendido entre 1990-1999, los resultados indican que si la estructura se hubiera mantenido constante a los niveles de 1990, el CCE<sub>p</sub> hubiera disminuido 4.76 GJ/ton papel, debido al factor eficiencia, en tanto que si la eficiencia se hubiera mantenido constante se hubiera disminuido 6.06 GJ/ton papel, debido al factor estructura. Cabe resaltar que el efecto eficiencia durante este periodo, contribuyó considerablemente en la disminución del consumo energético. Estos resultados encuentran explicación debido a que:

De 1990 a 1999 la industria mexicana de la celulosa y el papel sufrió muchos cambios, relacionados con mejoras tecnológicas y en los procesos de producción, al mismo tiempo estas mejoras condujeron a una mayor electrificación de los procesos, es decir, por un lado se mejora la eficiencia global, y por otro se demanda más energía eléctrica que en años anteriores, esta situación aunque contradictoria ha derivado en beneficios para la industria, ya que ha contribuido a la modernización parcial de la misma.

En lo que respecta a la influencia del factor estructural durante el periodo de 1990 a 1999 esta ha sido ligeramente menor comparada con el periodo de 1970 a 1999, debido a que el incremento de la participación de la fibra secundaria fue menor para este periodo, 67.8% en 1970 y 78.7% en 1999, cabe comentar que el incremento del uso de fibra secundaria se seguirá dando mientras los costos sigan siendo bajos y las nuevas tecnologías para su procesamiento sean rentables.

Sin embargo, existe un hecho que no puede ser ignorado, México tiene una posición muy vulnerable al ser un país en donde el porcentaje de reciclo sobrepasa al 80% y en donde se depende, para el suministro de fibras secundarias, principalmente del exterior (de 1990 a 1999 se han incrementado 62.5% las importaciones de fibra secundaria). Y más vulnerable todavía, siendo que los países de los que depende para este suministro utilizan su material recolectado cada vez en mayor medida y nos envían el material ya seleccionado y de menor calidad, con mayor cantidad de contaminantes de difícil separación lo que implica un mayor costo inicial y mayor costo energético.

La estructura de producción tanto de pulpa como de papel, durante este periodo de 1990 a 1999, estuvo dada de la siguiente manera en 1990 las pulpas químicas representaron el 83.8% del total de la producción, en tanto que el 14% fueron pulpas mecánicas y se

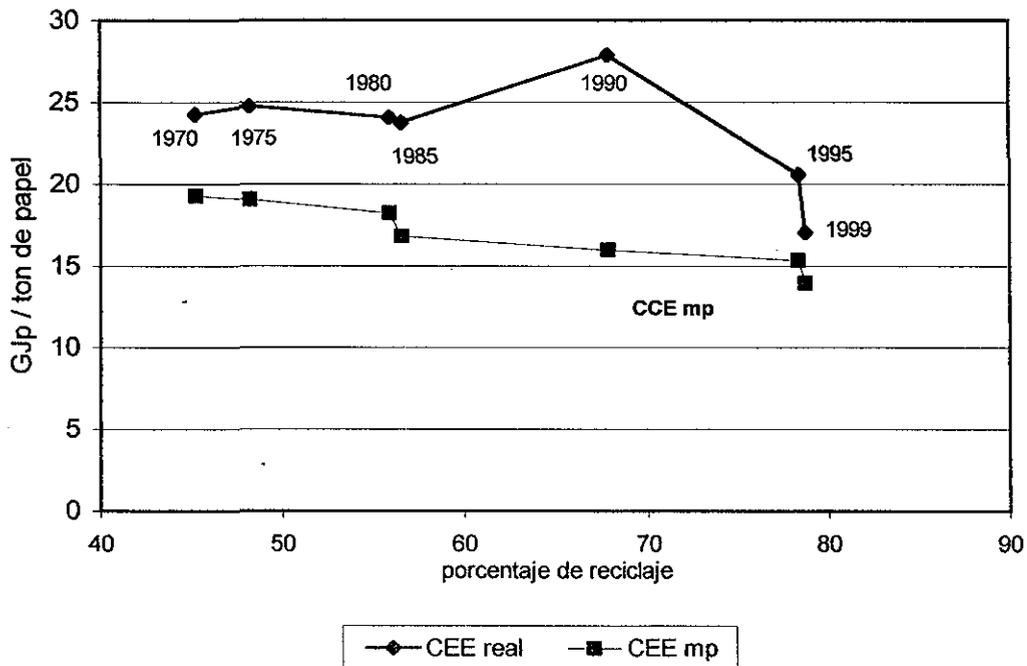
dejaron de producir otras pulpas, para 1999 la estructura de producción fue de 91.1% de pulpas químicas y 8.9% de pulpas mecánicas.

Mientras que la estructura de producción de papel en 1990 estuvo dada de la siguiente forma: 14% de papel periódico, 17.7% de papel escritura e impresión, 53.5% de papel empaque, 13.5% de papel sanitario y 1.3% de otros papeles; en tanto que en 1999 estuvo compuesta de la siguiente manera 6.5% de papel periódico, 18.4% de escritura e impresión, 57.1% de papel empaque, 17.4% de papel sanitario y 0.6% de otros papeles.

### 3.3.1 Análisis de estructura - eficiencia

Usando el método del análisis de estructura - eficiencia se comparó el CEE<sub>p</sub> actual con el CEE<sub>p</sub> de la "mejor práctica" de la industria de la celulosa y el papel mexicana de 1970 a 1999 debido a la disponibilidad de los datos de consumo de fibra secundaria y fibra virgen. En la gráfica 3.4 se puede observar la diferencia entre el EI CEE<sub>p</sub> y el CEE<sub>mp</sub> que tuvo el sector celulósico papelerero en México a lo largo del periodo de análisis, cabe mencionar que el cálculo de ambos consumos considera los factores estructurales de cada año.

**Gráfica 3.4 México: comparación del CEE real y el de la mejor práctica para la industria de la celulosa y el papel 1970-1999**



Fuente: Elaboración propia con datos de SE, 2000, Balance Nacional de Energía 1999, México, D. F.; Pemex, 1987, Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía de la Celulosa y el Papel; CNICP, 1993 y 2000, Memoria Estadística.

De acuerdo con la gráfica 3.4 se observó que de 1970 a 1980 la diferencia entre el  $CEE_{real}$  (es decir el  $CEE_p$  de cada año) y el  $CEE_{mp}$  se mantiene constante; durante este periodo la actividad del sector fue moderada (la producción de papel se incrementó a un tasa anual de 3.7%); mientras que el factor relacionado con la eficiencia energética tuvo una influencia mínima, ya que en este periodo las medidas de ahorro de energía y de eficiencia prácticamente no existían, sin embargo, los cambios estructurales relacionados con el uso de material reciclado evitaron que esta diferencia fuera mayor.

Para el periodo de 1985 a 1990, el  $CEE_p$  real se incrementó considerablemente, durante este corto periodo la producción de papel tuvo una tasa anual de crecimiento de 3.05% lo que significó un incremento similar al que se tuvo en el periodo de 1970-1980, en tanto, que el factor estructural presentó pocos cambios, en cuanto a las medidas de eficiencia energética ya existía una mayor conciencia de la importancia de éstas, sin embargo, no fue sino hasta el final de este periodo que los programas de ahorro de energía y las instituciones encargadas de promoverlos surgieron.<sup>52</sup>

En el último periodo de 1990 a 1999 se observa como la aplicación de medidas de eficiencia energética impactaron en la disminución del  $CEE_p$  real, aún cuando la producción de papel tuvo una tasa anual de 3.2%, los cambios estructurales y las mejoras de la eficiencia contribuyeron en la disminución de  $CEE_p$  real, ya que si bien es cierto que hubo cambios estructurales importantes, éstos no hubieran sido suficientes para disminuir el  $CEE_p$  real, tal como sucedió de 1970 a 1985.

Como se mencionó anteriormente, las mejoras en la eficiencia energética estuvieron relacionadas con: mejoras al proceso de elaboración de pulpa, los cambios tecnológicos en la producción del papel, el incremento del empleo de los gases de proceso de pulpa química para la cogeneración. También, la capacidad instalada se incrementó tanto en plantas integradas, como en semi-integradas a través de la modernización de los equipos de proceso existentes y de la construcción de nuevas plantas.

Al Comparar el  $CEE_p$  real de 1999 (17.05GJ<sub>p</sub>/ton de papel) con el  $CEE_p$  de la "mejor práctica", calculado para este mismo año (13.93 GJ<sub>p</sub>/ton de papel) se estimó que el potencial técnico de ahorro de energía en la industria de la celulosa y papel mexicana para 1999 era del 18%.

<sup>52</sup> La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) se estableció en 1989, mientras que El Fidecomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) surge a partir de 1990.

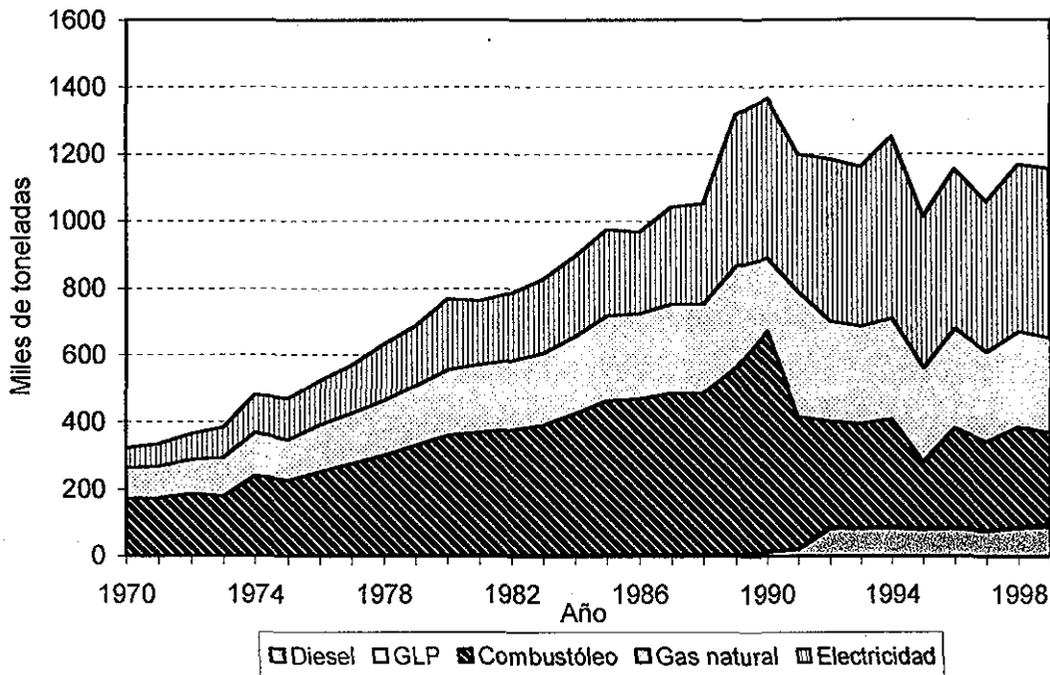
Es importante resaltar que el cálculo del  $CEE_{mp}$  considera los valores reportados en un año de referencia (que en este caso es 1990) en alguna parte del mundo, pero que son factibles de reproducirse, estos valores pueden variar y dependen de factores tales como: calidad de la pulpa, mejoras tecnológicas, entre otras, aunque un análisis mas estricto requiere comparar los valores de la "mejor práctica" (ver anexo 2) de cada año y de cada país. Sin embargo, debido a la poca disponibilidad de información, se llevó a cabo este tipo de análisis con sólo un año de referencia.

### 3.4 Emisiones de Carbono.

Las emisiones de carbono en la industria de la celulosa y el papel mexicana han aumentado en un 357% de 1970 a 1999, esto es de 0.322 a 1.15 millones de toneladas de carbono lo cual significó una tasa anual de crecimiento de 4.5%, las cuales se deben principalmente al uso de combustibles fósiles y de electricidad para la fabricación del papel. El factor que más influye en el incremento de las emisiones así como en el consumo de energía es el notable crecimiento de la producción de papel en estos años. Por otro lado la tasa de crecimiento de la energía primaria fue de 5.2% anual, esta diferencia entre la tasa de crecimiento de emisiones y la tasa de crecimiento de energía primaria tuvo dos razones principales: primero, se incrementó el uso de fibra secundaria, que demanda menor energía para su elaboración, y segundo existe una disminución del uso de combustóleo y una mayor participación de combustibles más limpios como el gas natural y el diesel, el cambio de emisiones por combustibles en el periodo de análisis se muestra en la gráfica 3.5, en ella se puede observar que de 1991 a 1999 las emisiones de carbono han disminuido debido a la mayor participación de diesel y gas natural durante el mismo periodo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Gráfica 3.5 México: emisiones de carbono por el consumo de combustibles en la industria de la celulosa y el papel**



Fuente: Elaboración propia con datos de: SE, Balance Nacional de Energía, varios años; IPCC, 1997 Greenhouse Gas Inventory Workbook y 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, p.16

### 3.4.1 Consideraciones para el consumo específico de energía y cambios en las emisiones de carbono en la industria mexicana de la celulosa y el papel

De acuerdo con la metodología de comparaciones internacionales señala que el consumo específico de energía para fabricar papel está influido por 3 factores: el tipo de materia prima (que en este caso puede ser fibra virgen o fibra secundaria); el tipo de productos finales (papel periódico, escritura e impresión, empaque, etc.) y la eficiencia del proceso.<sup>53</sup> Para explicar la contribución de estos factores en los cambios de CEE y compararlo con otros países, se siguió la recomendación de la metodología de comparaciones internacionales, de representar el CEE como una función de los cambios estructurales y de la eficiencia energética. Para el caso de la industria nacional de la celulosa y el papel, el factor estructural con mayor impacto en la disminución de CEE, es el incremento de la participación de la fibra secundaria en la fabricación de papel, debido principalmente a la disminución de producción de fibra virgen.

<sup>53</sup> Worrell, E., et. al., 1997, Op cit., p. 730-731

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

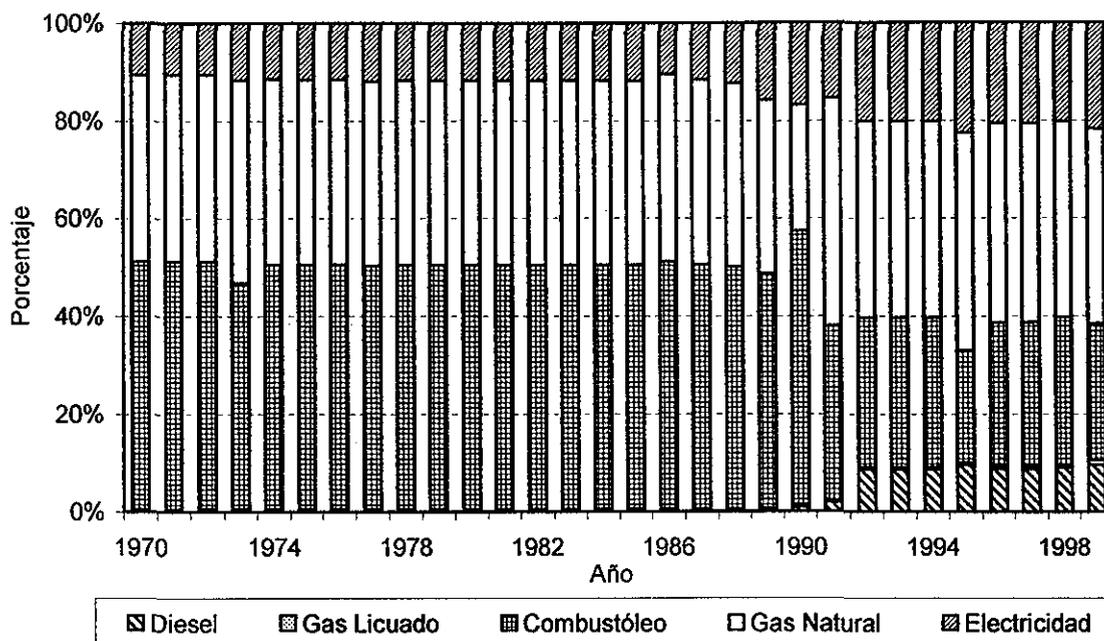
En lo que respecta a los productos finales es importante comentar que el consumo de energía depende en gran medida del tipo de papel que se esté elaborando en una planta. En general, los papeles sanitarios y faciales, así como los papeles para escritura e impresión son los que tienen un mayor CEE. Esto se debe a su mayor grado de elaboración, y a que se requiere de celulosas con procesos previos más elaborados, aunque en la actualidad algunos papeles para escritura e impresión se fabrican con 100% de fibras secundarias.

De acuerdo con lo anterior el factor estructural que sobresale es la razón de fibra secundaria en la producción de papel (ton de fibra secundaria/ton de papel), sin embargo, los datos disponibles a nivel internacional están en base a la razón de fibra virgen por producción de papel (ton de fibra virgen/ton de papel), debido a esto el análisis comparativo entre países se hace a través de este último factor.

Para el análisis de las emisiones de carbono en la industria de la celulosa y el papel en México es importante la mezcla de combustibles del sector y sus variaciones. Los combustibles empleados en 1999 en esta industria fueron: 40% de gas natural, 30.3% de combustóleo, 20.2% de electricidad, 9% de diesel y 0.5% de gas licuado.

En la gráfica 3.6 se muestra la variación de la mezcla de combustibles en este sector, la participación de gas natural se modificó ligeramente, aumentó de 38.3% en 1970 a 40% en 1999; mientras que la del combustóleo disminuyó de 50.4% a 30.3%. En lo que respecta a la participación de la electricidad, ésta se ha incrementado significativamente, de 10.6% en 1970 a 20.2% en 1999, por último la participación del diesel pasó de 0.6 % en 1970 a 9% en 1999, mientras que el gas licuado no tuvo participación hasta 1990 y se ha mantenido en el rango de 0.5% hasta 1999. Se observa que el combustóleo y el diesel son sustituidos generalmente por gas natural ya sea por precios o por restricciones ambientales.

**Gráfica 3.6 México: estructura del consumo de energía en la industria de la celulosa y papel**



Fuente: SE, Balance Nacional de Energía, varios años.

Sin embargo, a pesar de lo expuesto anteriormente se observó que de 1970 a 1999 las emisiones específicas de carbono tuvieron una ligera disminución de 360 a 304 kg de C/ton de papel, es decir, en un 15.6%. Por ello se empleó la metodología del análisis de descomposición (AVE-PDM2) para analizar el efecto de los cambios estructurales, de las mejoras en la eficiencia energética, de la sustitución de combustibles tanto en esta industria como en la generación de electricidad, en la disminución de las emisiones específicas de carbono. Estos efectos se presentan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 México: efectos de los cambios de las diferentes variables que influyen en las emisiones específicas de carbono en la industria de la celulosa y el papel**

	Cambios 1970-1999 [kg de C/ton de papel]	Cambios 1990-1999 [kg de C/ton de papel]
Variación de emisiones específicas	-56	-175.95
Efecto estructura (IFP/P)	-140.8	-49.67
Efecto eficiencia energética (E/IFP)	3.6	-129.93
Factores de emisión de carbono (FEC/E/E)	81.6	3.87

Fuente: Elaboración propia con datos del SE, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México; IPCC, 1997, *Greenhouse Gas Inventory Workbook*, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, p. 1.6

De 1970 a 1999, las emisiones específicas de carbono disminuyeron 56 Kg de C/ton de papel, el factor que más contribuyó en la reducción de las emisiones específicas de carbono fue el efecto estructura, este factor estuvo relacionado principalmente con el incremento en uso de fibra secundaria. En lo que respecta al efecto eficiencia se puede observar, que aun cuando no contribuyó a la reducción de emisiones específicas, su contribución al incremento de emisiones es mínima.

Para el periodo analizado, a pesar de la paulatina sustitución de combustóleo por electricidad, diesel y gas natural, el efecto de los factores de emisión no contribuyó a la reducción de las emisiones específicas debido al crecimiento de la participación de la electricidad en la mezcla de combustibles de la industria de la celulosa y el papel y a un incremento del factor de emisión de la electricidad.

El aumento de este factor se debió a que en 1970, el 57% de la generación eléctrica fue producida en plantas hidroeléctricas, las cuales no emiten bióxido de carbono a la atmósfera; mientras que en 1995 sólo un 29% es producida en plantas que emplean fuentes renovables o que no generan emisiones como son las hidroeléctricas, las geotérmicas, la eolétrica y la nuclear, y el resto de la electricidad es producida en plantas termoeléctricas aunque hay que considerar el mayor empleo de gas natural en los últimos años, esto último ha ocasionado que el FEC eléctrico no halla tenido un crecimiento sostenido en los último años del periodo (ver anexo 1).

En la década de los setentas, creció la generación de las plantas termoeléctricas que emplean combustóleo, en 1980 éstas contribuían con el 60% de la producción, la electricidad restante era generada en plantas de ciclo combinado o turbogás (11%), hidroeléctricas y geotérmicas (28%) y en plantas de combustión interna (1%). En 1995, las termoeléctricas que emplearon combustóleo sólo generaban el 48%; comparado con 1980 la electricidad se produjo con combustibles más limpios: gas natural (8%), energía nuclear (6%) y energías renovables (23%); por otro lado a partir de 1981 el carbón incrementa su participación en la mezcla de combustibles.<sup>54</sup>

Para el lapso comprendido entre 1990 a 1999, la disminución de emisiones específicas de carbono fue de 175.95 Kg de C/ton papel, las cuales fueron mucho mayores a las de todo el periodo de análisis, el efecto que más contribuyó para que se diera este resultado fue el efecto eficiencia, seguido del efecto estructura que tuvo una influencia menor, pero no despreciable si consideramos el "tamaño" del periodo.

En el caso del FEC para el periodo de 1990 a 1999 se puede observar que durante este periodo su contribución al incremento de las emisiones específicas ha sido mucho menor, entre los factores explicativos se encuentran que durante este periodo se dió la sustitución de diesel por combustóleo (ver gráfica 3.5) y se incrementó tanto la participación del gas natural como la de electricidad, aunque el factor de emisión de este último ha sido muy variable durante este periodo.

De acuerdo con estos resultados es posible concluir que la actividad del sector nacional de la celulosa y el papel ha sido el principal factor que ha contribuido de forma muy importante en el incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, tanto el uso de materiales reciclados, como la mejoras en la eficiencia energética, contribuyeron de manera importante en la disminución de las emisiones específicas, lo que ha evitado un mayor crecimiento en las emisiones de este sector, aunque cabe resaltar que la eficiencia energética ha contribuido solo al final del periodo de análisis (1990-1999), por lo que se espera que este tipo de factores sigan jugando un papel importante en la disminución de las emisiones de carbono.

### 3.5 Comparaciones Internacionales.

La industria de la celulosa y el papel a nivel mundial ha experimentado un elevado ritmo de crecimiento y desarrollo durante los últimos 25 años. La estructura de producción en 1999 (ver tabla 3.3), muestra que el 91.92% se concentra en 20 países de los cuales sólo los cuatro primeros productores, Estados Unidos, China, Japón y Canadá, cubrieron el 56% de la producción. Además, entre estos 20 países produjeron el 90.88% de la celulosa.

En 1999, la industria de la celulosa y el papel mexicana produjo 3.784 millones de toneladas (Mton) de papel, lo que representó el 1.22% de la producción mundial, ocupando el decimoséptimo lugar en el mundo. Para comparar y entender las tendencias de esta industria en el contexto mundial se seleccionaron, con base en la disponibilidad de datos, doce de los principales productores mundiales de papel: Estados Unidos, China, Japón, Canadá, Alemania, Finlandia, Suecia, Francia, Italia, Corea, Brasil y Reino Unido.

<sup>54</sup> Informes de operación de varios años de la Comisión Federal de Electricidad.

**Tabla 3.3. 20 Principales productores de papel y su producción de celulosa en 1999 en miles de toneladas**

<b>País</b>	<b>Producción de papel</b>	<b>Participación en la producción mundial (%)</b>	<b>Producción de celulosa</b>	<b>Participación en la producción mundial (%)</b>
Estados Unidos	88 776	28.64	57 609	33.13
China	34 237	11.04	17 221	9.90
Japón	30 631	9.88	10 910	16.27
Canadá	20 280	6.54	25 181	14.48
Alemania	16 742	5.40	1 731	1.00
Finlandia	12 947	4.18	12 118	6.97
Suecia	10 071	3.25	10 693	6.15
Francia	9 603	3.10	2 592	1.49
Corea	8 875	2.86	587	0.34
Italia	8 568	2.76	577	0.33
Indonesia	6 978	2.25	1 725	0.99
Reino Unido	6 576	2.12	517	0.30
Brasil	6 255	2.02	7 111	4.09
España	4 435	1.43	1 692	0.97
Austria	4 142	1.34	1 521	0.87
India	3 795	1.22	2 543	1.46
<b>México</b>	<b>3 784</b>	<b>1.22</b>	<b>538</b>	<b>0.31</b>
Países Bajos	3 256	1.05	117	0.07
Australia	2 564	0.83	2 233	1.28
Tailandia	2 434	0.79	836	0.48

Fuente: FAO, 2001, FAOSTAT; *Pulp, Paper and Paperboard*, [http://apps.fao.org/lim500/agri\\_db.pl](http://apps.fao.org/lim500/agri_db.pl), UN Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.

Como se mencionó anteriormente el consumo específico de energía es función del tipo de materia prima utilizado en el proceso, los tipos de procesos empleados, el tipo de productos finales y la eficiencia de los procesos de manufactura; donde el factor estructural más representativo para la comparación internacional es el porcentaje de pulpa que se introduce en la fabricación del papel. A continuación se presenta en la tabla 3.4 las principales características de la producción de papel en los países analizados para los años de 1988 y 1999, los cuales se seleccionaron por la disponibilidad de datos.

**Tabla 3.4. Producción de Pulpa y Papel en los Países Seleccionados en los Años de Comparación, miles de toneladas**

País	1988			1993			1999		
	Pulpa	Papel Reciclado	Papel	Pulpa	Papel Reciclado	Papel	Pulpa	Papel Reciclado	Papel
Alemania	2 770	5 657	10 902	2 058	7 067	13 034	1 731	7 710	16 742
Brasil	4 054	1 473	4 685	5 501	1 307	5 352	7 111	2 448	6 255
Canadá	23 072	1 614	16 639	22 911	2 985	17 557	25 181	3 179	20 280
Corea	313	2 748	3 659	447	4 155	5 804	587	6 194	8 875
China	13 727	6 632	15 740	17 442	9 475	22 077	17 221	18 799	34 237
Estados Unidos	54 590	15 866	69 587	57 226	27 228	77 250	57 609	33 725	88 776
Finlandia	8 842	373	8 652	9 338	525	9 990	12 118	642	12 947
Francia	2 073	2 812	6 313	2 540	3 410	7 975	2 592	5 486	9 603
Italia	809	2 414	5 512	482	3 765	6 019	577	4 785	8 568
Japón	10 237	12 539	24 625	10 448	15 206	27 764	10 910	14 853	30 631
México	947	1 763	3 375	343	1 540	2 447	538	2 048	3 784
Reino Unido	442	2 573	4 295	554	3 130	5 282	517	4 351	6 576
Suecia	10 307	868	8 161	9 953	1 319	8 781	10 693	1 922	10 071

Fuente: FAO, 2001, FAOSTAT; *Pulp, Paper and Paperboard*, [http://apps.fao.org/lim500/agri\\_db.pl](http://apps.fao.org/lim500/agri_db.pl), UN Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.

En esta tabla se observan las grandes diferencias en la estructura de producción que existen entre los países, al igual que las variaciones en la estructura interna de cada uno. En los datos desagregados por tipo de pulpa y papel destacan la sustitución de pulpa mecánica por pulpa química como el aumento en la producción de papeles para impresión, empaque y sanitario, estos datos desagregados se pueden consultar en el Anexo 3.

De acuerdo con tabla 3.4 todos los países analizados incrementaron el uso de papel reciclado, en algunos casos este incremento fue muy alto como en el caso de Corea, China y Estados Unidos, sin embargo la producción de celulosa no presentó un incremento similar, de hecho países como Alemania y México disminuyeron su producción a poco menos del 50%; esto muestra la clara tendencia de la mayoría de los países de utilizar cada vez más el papel reciclado, esto se debe principalmente a que los costos de producción son menores cuando se usa fibra secundaria.

En general se puede decir que la producción de papel se ha incrementado más rápidamente que la producción de pulpa, esto se puede explicar debido al creciente uso de fibra secundaria en la producción de papel. Sin embargo, en el caso de los países con mayor producción de pulpa, como Canadá, Brasil y Suecia, el uso de fibra secundaria es menor con respecto al resto de los países analizados, esta es una de las razones por las que su CEE es más alto.

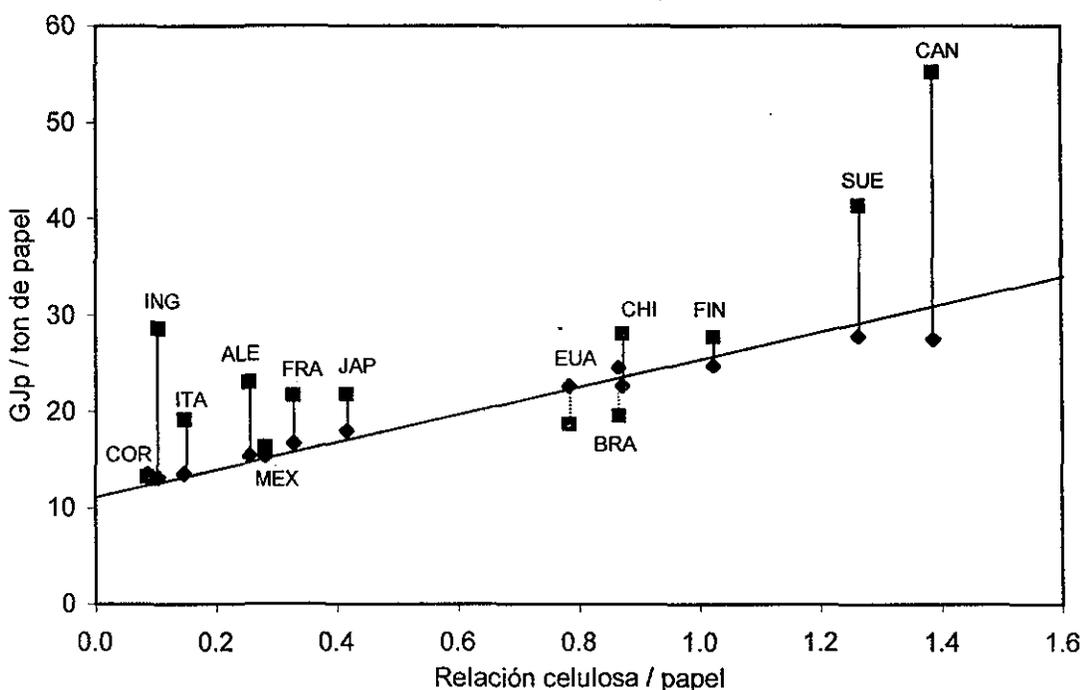
Con la información de la tabla 3.4 se calculó el CEE<sub>p</sub> real y el CEE<sub>mp</sub>, para los años de análisis, con este procedimiento se puede observar el potencial de ahorro de energía que tiene cada país y comparar entre ellos su situación, así como analizar el comportamiento a través del tiempo de cada uno, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.5, mientras que la representación gráfica de estos resultados se pueden observar en las gráficas 3.7 y 3.8.

**Tabla 3.5 Consumo específico de energía para la industria de la celulosa y el papel (GJ/ton de papel)**

País	1988			1999		
	Real	Mejor Práctica	Potencial de ahorro	Real	Mejor Práctica	Potencial de ahorro
Alemania	23.0	15.5	32.9	16.9	13.2	22.4
Brasil	19.5	24.5	-25.7	46.7	29.5	36.8
Canadá	55.2	27.5	50.2	50.1	26.3	47.4
Corea	13.3	13.5	-1.5	13.3	12.8	4.0
China	28.1	22.7	19.3	16.5	18.2	-10.1
Estados Unidos	18.7	22.7	-21.5	25.7	21.1	17.8
Finlandia	27.7	24.7	10.8	27.6	23.9	13.2
Francia	21.6	16.7	22.8	22.7	15.9	30.1
Italia	19.2	13.6	29.2	18.7	13.1	29.9
Japón	21.7	18.0	17.3	19.0	17.3	9.0
<b>México</b>	<b>16.3</b>	<b>15.4</b>	<b>5.7</b>	<b>15.4</b>	<b>13.7</b>	<b>11.2</b>
Reino Unido	28.6	13.1	54.0	22.9	13.0	43.1
Suecia	41.4	27.8	32.8	35.4	25.4	28.3

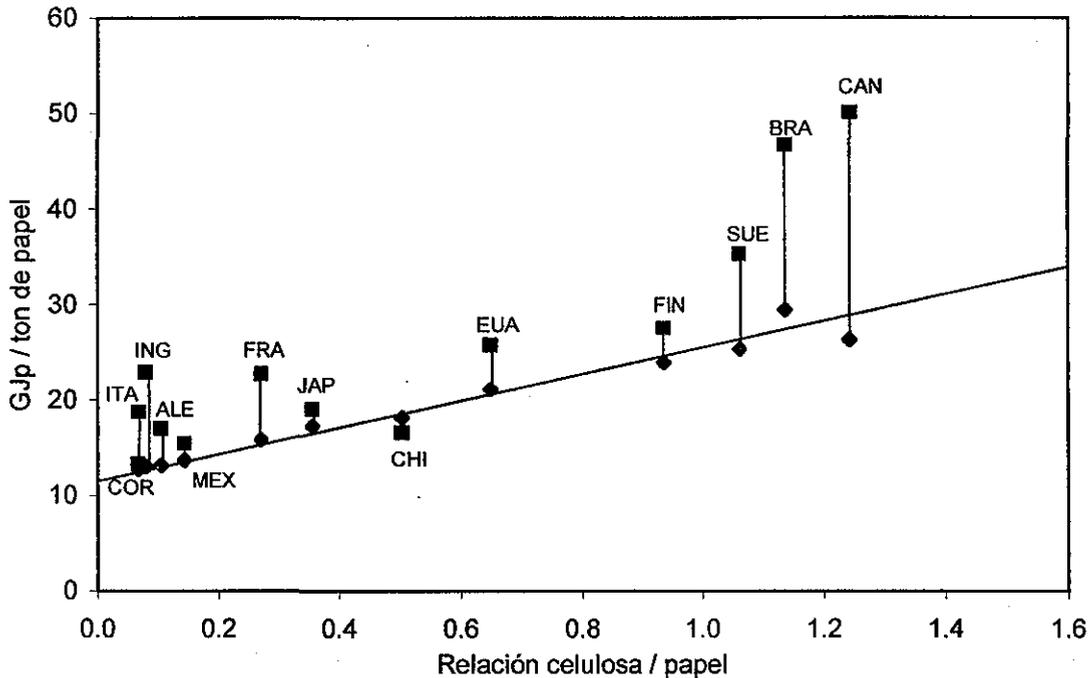
Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO y OCDE.

**Gráfica 3.7 Comparación Internacional del CEE<sub>p</sub> real y de la Mejor Práctica para 1988.**



Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO y OCDE.

**Gráfica 3.8 Comparación Internacional del CEE<sub>p</sub> real y de la Mejor Práctica para 1999.**



Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO y OCDE.

En el caso de México se observa una disminución en el CEE<sub>p</sub> real y el CEE<sub>mp</sub> de 1988, esta situación se puede atribuir a los cambios estructurales relacionados con el incremento de usos de papel reciclado y las mejoras en la eficiencia energética que se han venido dando en los últimos años de este periodo.

En la tabla 3.5 resaltan dos resultados en el caso de la industria nacional; primero el potencial de ahorro técnico de energía es menor en 1988 que en 1999; y segundo el valor del CEE<sub>mp</sub> de 1988 es igual al CEE<sub>p</sub> real de 1999. Esto se debe a que el cálculo de ambos CEE de la producción de papel de la mejor práctica llevan implícitos procesos más electrificados, por lo que se está comparando una industria que prácticamente no usaba electricidad con un estándar electrificado. En 1999 la industria nacional de la celulosa y el papel tuvo una mayor participación eléctrica,<sup>55</sup> este hecho contribuyó a que los estándares nacionales fueran muy cercanos a los de las mejores practicas.

<sup>55</sup> La participación de la electricidad en 1988 fue 11.5%, mientras que en 1999 fue 20.2%.

Con respecto a los demás países se observa que México tenía en 1988 el potencial de ahorro mínimo en relación con el resto de los países analizados, sin embargo su relación pulpa/papel es menor que la mayoría de estos países, por lo que no se puede hablar de una buena posición en cuanto a eficiencia energética, ya que un país con una relación alta de pulpa papel puede tener potenciales similares o menores tal como lo muestra la gráfica 3.7. En ese año destaca el Reino Unido con un enorme potencial, desproporcionado a su producción de celulosa y papel.

También es importante el caso de Estados Unidos, Brasil y Corea con potenciales negativos pudiendo deberse estos resultados a la forma de contabilizar los combustibles principalmente el licor negro, ya que la diferencia entre el consumo específico de la mejor práctica y el real debe ser mayor cuando crece la relación celulosa/papel. Otro aspecto que contribuye en este resultado son los reportes estadísticos, que durante 1988 no incluían algunos combustibles en el balance de la OCDE,<sup>56</sup> y que representan un importante porcentaje en la participación del consumo en este sector, por ejemplo, para este año Estados Unidos no reporta el consumo de gas natural, el cual representó el 25% del total de energía primaria consumida durante 1999, lo mismo sucede en el caso de Brasil y Corea.

Con respecto a Finlandia, otro gran productor de celulosa, con potencial mayor que México durante 1988, el resultado demuestra la capacidad de su industria papelera para trabajar eficientemente si consideramos su relación celulosa papel en este año. Por último, en 1999, el potencial de ahorro de energía aumenta en poco más de la mitad de los países analizados, esto se debe por un lado a las cuestiones estadísticas antes explicadas y por el otro a la tendencia de una mayor electrificación en estos países, resalta el caso brasileño, porque pasa de un potencial negativo a uno positivo muy alto, propio de los países netamente exportadores de celulosa. Es importante mencionar que el consumo específico de energía de la mejor práctica ha aumentado también por el incremento en la calidad de los papeles que se producen.

Para 1999, el potencial de ahorro de México, comparando con los países con una estructura parecida en la producción es menor, aunque se ve favorecido por tener menor participación de electricidad en el consumo de energía total, ya que la mayoría de estos países tienen una mayor participación de electricidad lo que incrementa su CEE<sub>p</sub>, situación que pondría a la industria papelera nacional en mala posición con respecto a

<sup>56</sup> Esta tesis utiliza la base de datos de la OCDE para el análisis de las Comparaciones Internacionales.

estos países, salvo el caso del Reino Unido que tiene un potencial altísimo y una participación de la electricidad debajo del promedio.

Cabe resaltar que en los dos años de comparación Canadá, el país con mayor relación celulosa/papel, presenta el mayor consumo específico y aunque el potencial de ahorro todavía es importante ha disminuido de 50.2% a 47.4%, lo que muestra un claro interés de un país cuyas condiciones le permiten no ser necesariamente eficientes, por ejemplo, aún cuando en el invierno el consumo de electricidad proveniente de las centrales hidroeléctricas, prácticamente sea regalada debido a la necesidad de mantener las turbinas funcionando, el potencial de ahorro eléctrico ha disminuido de 39.2% a 27.5%. Otros países como Estados Unidos y Finlandia son muestra de que países con relaciones altas de celulosa papel, pueden tener bajos potenciales de ahorro de energía, debido principalmente a la forma eficiente en que opera la industria en estos países.

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

Según previsiones de la FAO, en el periodo 1993-2010 el consumo mundial de papel prácticamente se duplicará. Ya que en las últimas tres décadas el consumo de papel creció a una media cercana del 6% en los países en desarrollo y en algo más del 2% en los países desarrollados y se espera que a nivel mundial la demanda siga creciendo a un ritmo de 2.7% anual.<sup>57</sup> En cuanto a la composición de la producción, el interés de las principales empresas papeleras es utilizar en mayor medida el material reciclado debido a la disminución de costos que esto implica.

En México de acuerdo a estimaciones de la Comisión de Planeación y Estadística de la Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y el Papel y con base a perspectivas de la economía nacional para los próximos cinco años, se espera que para el año 2004, el consumo aparente de papel crecerá en 1 millón 602 mil toneladas respecto de 1999, estimando alcanzar 6 millones 565 mil toneladas, así como un incremento en la capacidad instalada para la producción de papel de 755 mil toneladas para esa misma fecha. Bajo esta perspectiva de crecimiento mundial de la producción de papel, se espera que la producción en México y América Latina aumente con una mayor tasa de crecimiento comparada a la de los países industrializados.

<sup>57</sup> Revista Investigación y Técnica del Papel, Num 144, 2000, Madrid España .

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

En estos últimos años se han desarrollado varias mejoras en la eficiencia energética de la industria de la celulosa y papel mexicana, como se mencionó en los incisos anteriores. Sin embargo, se estimó que todavía existe un potencial técnico de ahorro de energía del 15%. Lo que pone de manifiesto la importancia de seguir impulsando los programas de ahorro de energía que pueden ir de la mano con programas de reciclado que hasta el momento se encuentran poco desarrollados en nuestro país.

### **Conclusiones**

Entre 1970 y 1999, el consumo de energía primaria en la industria de la celulosa y papel en México aumentó 42.97 GJ. El factor que influyó en mayor medida en el incremento del consumo de energía en esta industria durante este periodo fue el nivel de producción de papel, otros factores que también contribuyeron en el incremento del consumo de energía primaria fueron: la electrificación de los procesos; y algunos cambios estructurales relacionados con el tipo de productos finales (papel sanitario y escritura e impresión, etc), que tienen un mayor CEE<sub>p</sub>, esto se debe a su mayor grado de elaboración, y a que se requiere de celulosas con procesos previos más elaborados, aunque en la actualidad algunos papeles para escritura e impresión se fabrican con 100% de fibras secundarias.

Sin embargo, este incremento hubiera sido mayor si no se hubieran dado, por un lado cambios estructurales principalmente los relacionados con el la creciente participación de fibra secundaria (que en 1970 fue 45.2% mientras que en 1999 fue de 78.7%); y por el otro la implementación de medidas de eficiencia energética que estuvieron relacionados con: sustitución e implementación de equipos más eficientes (motores de alta eficiencia, variadores de velocidad, etc.); cambios tecnológicos en la producción de papel (relacionados principalmente con la preparación y limpieza de fibras), automatización de algunos de los procesos, además de que la capacidad instalada se incrementó tanto en plantas integradas como semi-integradas a través de la modernización de los equipos de proceso existentes y de la construcción de nuevas plantas.

Otro aspecto que esta relacionado con la eficiencia energética es la cogeneración eléctrica en el sector celulósico papelerero; que en nuestro país, tiene uno de los

porcentajes más altos en este rubro, de 1990-1999 la energía autogenerada representó alrededor de 20% del consumo total de electricidad del sector. Lo que ha propiciado una disminución en la demanda de energía eléctrica. Estos cambios estructurales y las mejoras en la eficiencia energética permitieron también, que el consumo específico de energía primaria (CEE<sub>p</sub>) disminuyera de 1970 a 1999 de 24.21 a 17.92 GJ/ ton papel.

En lo que respecta a las emisiones de carbono en la industria de la celulosa y el papel mexicana estas han aumentado en un 357% de 1970 a 1999, esto es de 0.322 a 1.15 millones de toneladas de carbono lo cual significó una tasa anual de crecimiento de 4.5%, las cuales se deben principalmente al uso de combustibles fósiles y de electricidad para la fabricación del papel. Al igual que en el consumo de energía, el factor que más influye en el incremento de las emisiones así como en el consumo de energía es el notable crecimiento de la producción de papel en estos años. Al igual que el consumo de energía, los cambios estructurales ya mencionados y las mejoras en la eficiencia permitieron una disminución en las emisiones específicas de carbono de 360 a 304 kg de C/ton de papel, es decir, en un 15.6%.

En cuanto a la posición de la industria mexicana de la celulosa y el papel en el ámbito internacional, se puede decir, que es buena, si consideramos los resultados del análisis de comparaciones internacionales, al comparar con los países que tienen una estructura similar en el uso de fibra reciclada y pulpa virgen. Sin embargo, hay que ser prudentes con la interpretación de este resultado ya que este análisis, no considera algunos datos que pueden variar el resultado, como por ejemplo el nivel de penetración de la cogeneración, que como se mencionó en la sección 3.5, no se dispone de este dato en todos los casos, por lo que este resultado puede tomarse como una primera aproximación.

Finalmente podemos decir que, a pesar de que las mejoras en la eficiencia han contribuido en la disminución del CEE y en las emisiones específicas de carbono es evidente que el papel que juega la eficiencia energética en el sector celulósico papelero aún no ha alcanzado un nivel deseable, y que como vimos no ha mantenido un efecto positivo durante todo el periodo de análisis, lo que pone de manifiesto la necesidad de continuar con las mejoras en la eficiencia en este sector.

## Conclusiones

En México la industria de la celulosa y el papel se clasifica dentro de las más intensivas en el uso de la energía. En 1999 la participación correspondiente a esta rama fue de 3.8% en relación con el total de consumo energético industrial. El consumo de energía eléctrica de este sector se incrementó a un ritmo anual de 3.6% entre 1970 y 1999.

De acuerdo con los resultados de este análisis (que considera el periodo de 1970-1999), entre las principales causas del incremento del consumo energético se encuentran, en orden de importancia: el incremento en la producción de papel, la cual creció a una tasa anual de 5.1% para el mismo periodo; y algunos cambios estructurales relacionados con los diferentes tipos de papel producidos.

Cabe aclarar que de acuerdo con lo descrito en esta tesis, los factores estructurales definidos como: participación de fibra secundaria, tipos de procesos para la fabricación de pulpa y tipo de papeles fabricados, influyen de forma diferente, en algunos casos contribuyen al incremento del consumo, mientras que en otros en la disminución.

Los resultados muestran que en el caso de México el factor estructural que mas ha contribuido a evitar un mayor crecimiento en el consumo energético, es el creciente uso de fibra secundaria, la cual ha venido incrementando su participación de 45.2% en 1970 a 78.7% en 1999. Cabe comentar que el continuo incremento en uso de la fibra secundaria para la producción de papel sitúa a México en el segundo lugar a escala mundial en el uso de papel reciclado.

Los otros dos factores estructurales considerados en esta tesis, han presentado una influencia variable, sin embargo, la suma de los efectos de estos dos factores a lo largo del periodo de análisis presenta un resultado que favorece el incremento del consumo de energía.

En tanto que el factor relacionado con la eficiencia energética, también ha contribuido en la disminución del consumo energético, pero de acuerdo con los resultados, este factor sólo influyó en la disminución del consumo de 1990-1999. Entre las mejoras en la eficiencia que han contribuido en la disminución del consumo energético se encuentran: mejoras al proceso de elaboración de pulpa (los ahorros más representativos se dan en el pulper y en la refinación), el incremento del empleo de los gases de proceso de pulpa

química para la cogeneración, la sustitución e implementación de equipos (motores eléctricos, variadores de velocidad, entre otros).

Como ya se mencionó el factor relacionado con la eficiencia energética no contribuye en la disminución del consumo eléctrico en la mayor parte del periodo de análisis, lo que muestra el poco "eco" que tenían en este sector las mejoras en la eficiencia hasta antes de 1990.

Una característica del sector celulósico papelerero en nuestro país es la alta participación de la autogeneración eléctrica, la cual tiene uno de los porcentajes más altos dentro del sector industrial en este rubro, de 1990 a 1999 esta energía representó alrededor de 20% del consumo total de electricidad del sector. Lo que ha propiciado una disminución en la demanda de energía eléctrica. Cabe mencionar que de acuerdo con una revisión con los permisos otorgados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) se pudo constatar que la mayor parte de los permisos otorgados bajo la modalidad de autogeneración, en realidad operan con esquemas de cogeneración.

Al analizar las cifras de este sector, observamos que se han dado cambios importantes en cuanto a la estructura de consumo de combustibles, la participación de gas natural aumentó de 38.3% en 1970 a 40% en 1999; mientras que la del combustóleo disminuyó de 50.4% a 30.3%. En lo que respecta a la participación de la electricidad se ha incrementado significativamente, de 10.6% en 1970 a 20.2% en 1999, por último la participación del diesel pasó de 0.6 % en 1970 a 9% en 1999, mientras que el gas licuado no tuvo participación hasta 1990 y se ha mantenido en 0.5% hasta 1999. Se observa que el combustóleo y el diesel son sustituidos generalmente por gas natural ya sea por precios o por restricciones ambientales.

En cuanto a las emisiones de carbono para este sector, se observó que de 1970 a 1999 las emisiones específicas tuvieron una ligera disminución de 360 a 330 Kg de C/ton de papel, es decir, cayeron 8.3%. La causa de este descenso se debe al incremento de la participación de diesel y en los últimos 10 años, sin embargo como ya se mencionó también se ha incrementado la participación de electricidad, cuyo factor de emisión también ha crecido debido a la estructura de generación actual.

El potencial técnico de mejoramiento de eficiencia energética de la industria de la celulosa y el papel mexicana fue de 18% en 1999 y se calculó de acuerdo a sus características actuales de producción, la materia prima empleada y la tecnología de los procesos de fabricación.

Al respecto cabe comentar que si bien es cierto que el factor que ha influido más en la disminución del consumo específico es el incremento en el uso de fibra secundaria, en un futuro esto puede representar un serio problema, debido a que México tiene una posición muy vulnerable al ser un país que depende principalmente del exterior, esto porque los países de los que dependemos para este suministro utilizan su material reciclado cada vez en mayor medida y nos envían material reciclado con menor calidad que demanda más elaboración en su preparación y por ende en el consumo de energía.

Los problemas principales del uso de fibra secundaria en México radican en su recolección y clasificación, lo que sucede generalmente antes de su llegada a la fábrica de papel. La recolección en sí no representa un problema especial en nuestro caso; pero sí tiene ciertas dificultades, generalmente por motivos políticos y gremiales, relacionados con la recolección de basura en general.

Una manera de obtener calidades uniformes y controladas, es la compra directa en centros de conversión, donde se originan cantidades importantes de virutas y papel desperdicio uniformes; como imprentas, editoriales, fábricas de cajas, etc. La selección de los materiales ya captados es un problema más difícil. La mayor parte de las veces el recolector no tiene interés en seleccionar el material, y tampoco tiene los medios adecuados para hacerlo en forma eficiente. Aunque actualmente sería posible hacer una buena selección, dados los bajos niveles de salario vigentes, pocas fábricas lo hacen en forma correcta y debidamente mecanizada para tener cierta eficiencia en el uso de mano de obra. Esto desde luego requiere cierta inversión y mecanización de la selección.

### *Análisis Internacional*

El análisis de comparaciones internacionales se hizo hasta 1999, ya que se contó con la información a nivel internacional hasta este año. El cálculo involucra las características de producción de cada año, tipos de procesos empleados en la producción de celulosa y productos finales, es decir, tipo de papeles fabricados; la materia prima empleada, porcentaje de participación de la pulpa virgen y fibra secundaria; y la tecnología de los procesos de fabricación. Este último punto está relacionado con la comparación que se hace del CEE actual con el de la mejor práctica, referido a la producción de una planta en cualquier parte del mundo con el menor consumo específico de energía que puede ser fabricada con la mejor tecnología probada a costos razonables. En este análisis se utilizaron valores de la mejor práctica referidos al año 1990. Cabe aclarar que el cálculo para México en estas comparaciones no incluye la autogeneración reportada en el

Balance Nacional de Energía debido a que para el resto de los países no se cuenta con esta información.

Debe tomarse en cuenta que el CEE de la mejor práctica, lleva implícito un nivel de participación de la electricidad en el consumo de energía, por lo que si en un país ésta no ha alcanzado dicho nivel, su potencial estará sesgado a la baja y por el contrario, si en otro país la electricidad tiene mayor participación que la correspondiente a la mejor práctica, el potencial calculado tenderá a ser mayor.

Los resultados del análisis de comparaciones internacionales con los países que tienen una estructura similar en el uso de fibra reciclada y pulpa virgen, indican que en 1999 el potencial de ahorro de energía primaria de México (con una participación de fibra secundaria de 78.7%) es de 11.2%, en Francia (68.0%) es de 30.1%, en Italia (89.2%) de 29.9%, en Alemania (81.7%) de 22.4% y en el Reino Unido (89.4%) de 43.1%.

A pesar de que el resultado anterior muestra una situación favorable para México respecto a otros países que tienen factores estructurales similares (relacionados con el uso de papel reciclado), hay que ser prudentes con la interpretación de este resultado ya que este análisis, no considera algunos datos que pueden variar el resultado como por ejemplo, el nivel de penetración de la cogeneración, que como se mencionó antes no se dispone de este dato en todos los casos, por lo que este resultado puede tomarse como una primera aproximación.

Una vez que se conocen los factores que promovieron los cambios en el consumo de energía en la industria mexicana de la celulosa y el papel podemos dar respuesta a las hipótesis establecidas:

#### Hipótesis 1

- *La reducción del consumo de energía a través de mejoras en la eficiencia energética y el creciente uso de papel reciclado, en nuestro país ha llevado a la industria de la celulosa y el papel a reducir las emisiones específicas de gases de efecto invernadero.*

Efectivamente los cambios estructurales relacionados con el uso de papel reciclado han contribuido de manera importante en la disminución del consumo de energía, de hecho gracias a este incremento en el uso de fibra secundaria durante 1970 a 1999, el consumo de energía primaria no ha sido mayor, de acuerdo con los resultados de la aplicación de la metodología de descomposición (AVE-PDM) muestran que han contribuido a evitar un

aumento de aproximadamente 31% en el consumo de energía primaria. En cuanto a las emisiones específicas de CO<sub>2</sub>, estos cambios estructurales contribuyeron con 62% de la variación de emisiones específicas (ver tabla 3.2) mientras que la eficiencia energética a lo largo de todo el periodo de análisis no contribuyó con la disminución de emisiones específicas si no que participó con el 1.58% en el incremento de las emisiones específicas de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, cuando consideramos sólo el periodo comprendido entre 1990 y 1999, los resultados muestran que el factor eficiencia contribuye de manera muy importante en la variación de las emisiones específicas de CO<sub>2</sub>, este factor permite una disminución cercana al 70% en las emisiones específicas de este periodo, en tanto que el factor estructural permite una disminución de 27% del total de emisiones específicas de CO<sub>2</sub>.

Hipótesis 2:

- *Sigue existiendo potencial de mejoramiento energético y por ende posibilidad en la disminución de emisiones específicas de CO<sub>2</sub>, no sucede lo mismo con el incremento en el uso de papel reciclado.*

De acuerdo con lo descrito, el potencial técnico de mejoramiento de eficiencia energética de la industria mexicana de la celulosa y el papel fue de 18% en 1999, es decir, que existe la posibilidad de que se sigan dando mejoras en la eficiencia lo que da la posibilidad de una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cabe comentar que este potencial se calcula en base a una referencia internacional, y que si bien es cierto, que permite estimar el potencial técnico de ahorro, lo conveniente a nivel nacional sería establecer una comparación entre valores de las mejores prácticas nacionales, esta comparación muy probablemente modificaría el potencial de ahorro dando valores mas cercanos dadas las características de la industria nacional, sin embargo, no se cuenta con esta información y por lo tanto, no es posible establecer la comparación.

Cabe comentar que aunque la participación de papel reciclado se ha incrementado, es posible que en los próximos años no se de al mismo nivel que en años anteriores (prácticamente se usa un 80% de papel reciclado en la producción de papel), ya que existe la posibilidad de que signifique un problema en el futuro. Sin embargo, el incremento del uso de fibra secundaria se seguirá dando mientras los costos sigan siendo bajos y las nuevas tecnologías para su procesamiento sean rentables.

### *Comentarios y Sugerencias*

Hasta ahora se han comentado los factores que han favorecido una disminución o un incremento en el consumo energético, sin embargo, es necesario exponer algunas alternativas que permitan continuar con los esfuerzos en la mejoras de eficiencia en este sector, sobre todo considerando que la influencia de las mejoras en la eficiencia energética no han sido tan importantes como la influencia de los factores estructurales en la industria nacional de la celulosa y el papel.

A continuación se enuncian algunos posibles programas que se consideran necesarios y factibles de realizar, aunque cabe mencionar que algunos aspectos que son planteados en estos programas se han venido desarrollando ó bien se encuentran en su primera etapa de desarrollo.

- Programas de evaluación de tecnologías existentes y tecnologías emergentes de eficiencia energética industriales

Para llevar a cabo este tipo de programas es necesario partir del hecho de que debe existir un mayor conocimiento de la naturaleza de los procesos en cada sector, uno de los objetivos de estos programas es ubicar las tecnologías que son usadas actualmente y la viabilidad técnica y económica de sustitución, en el corto y mediano plazo. Un ejemplo de este tipo de programas es el seguido por la Office of Industrial Technologies (OIT) del Departamento de Energía de Estados Unidos (USDOE).

- Programas de monitoreo y de mejores prácticas nacionales

Con el desarrollo de este tipo de programas es posible conocer las condiciones actuales y las condiciones deseables en cada caso, el establecimiento de las mejoras prácticas involucra el conocimiento a fondo de aspectos como: la mejor forma para producir un producto a nivel nacional, la mejor tecnología probada a costos razonables y un monitoreo de los consumos promedios nacionales por tipo de producto. Lo anterior lleva a la necesidad de establecer mejores vínculos y nuevos mecanismos de flujo de información entre los sectores involucrados. Ejemplo de este tipo de programas son los también desarrollados por la OIT.<sup>58</sup>

- Programas que fomenten los servicios energetico-ambientales

---

<sup>58</sup> Algunos de los resultados de este tipo de programas pueden ser consultados en <http://www.oit.gov/bestpractices>.

Aún cuando la industria en general es cada vez más consciente del ahorro potencial que pueden generar los programas de eficiencia energética (la cual se debe a los esfuerzos del FIDE y la Conae, pero también al aumento en el precio de los combustibles y las tarifas eléctricas), muchas empresas han limitado sus esfuerzos de eficiencia energética a la realización de auditorías de energía, sin embargo el alcance de las medidas aplicadas hasta el momento ha sido limitado, principalmente por que los presupuestos son restringidos y a la existencia de oportunidades de inversión no relacionadas con la energía, lo que ocasiona la relegación de inversiones sobre eficiencia energética a segundo e incluso a tercer plano, por lo que el interés en servicios ecoenergéticos<sup>59</sup> (servicios enfocados a la disminución del consumo de energía que permiten una disminución en las emisiones contaminantes) no ha aumentado como ha ocurrido en otros países y no debe descartarse la posibilidad de evaluar esta alternativa para alcanzar un mayor nivel de eficiencia energética.

- **Elaboración de prospectiva de tecnología de eficiencia energética en el sector**

Este tipo de estudios dan una visión global, y tiene como uno de sus objetivos anticipar los riesgos y oportunidades que pueden influir en los mercados tecnológicos futuros, aunque este tipo de estudios es aplicable a largo plazo, hay que considerar que esta base de conocimientos permite anticipar una política conforme a los objetivos de una empresa y decidir cuándo entrar al mercado con un mínimo de riesgos.

Es evidente que el papel que juega la eficiencia energética en el sector celulósico papelerero aún no ha alcanzado un nivel deseable, y que como se observó no mantuvo un efecto positivo en la disminución del consumo de energía durante todo el periodo, aunque en la última década si lo hizo. Por lo que existe la necesidad de un seguimiento de la influencia que tienen las mejoras en la eficiencia energética sobre un sector que ha cambiado mucho en los últimos años.

---

<sup>59</sup> Comisión Para la Cooperación Ambiental (2001), México y el incipiente mercado de emisiones de carbono, Québec Canadá.

## Anexo 1

### Factores de emisión de carbono para la electricidad de 1970 a 1999

Año	Factor de emisión [ton de C/TJ]
1970	35.5
1971	40.6
1972	41.7
1973	42.7
1974	44.3
1975	50.3
1976	48.3
1977	46.4
1978	51.2
1979	49.4
1980	53.1
1981	46.6
1982	48.6
1983	51.3
1984	51.0
1985	49.6
1986	53.2
1987	54.8
1988	53.8
1989	52.7
1990	51.5
1991	51.8
1992	49.4
1993	49.5
1994	54.6
1995	49.0
1996	49.02
1997	51.18
1998	53.17
1999	50.41

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

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Anexo 2

### Descripción de las mejores prácticas en la industria de la celulosa y el papel

#### Pulpa mecánica de madera

La pulpa mecánica de madera en las estadísticas de la FAO incluye pulpa de madera (proveniente de árboles) y pulpa de madera termomecánica (Chipeta, 1996). En el pulpeo mecánico, una gran cantidad de calor es liberada por la acción de molienda. Desde que este calor recuperado no se muestra como un consumo de energía para la industria de la celulosa y el papel, le asignamos un valor negativo al calor específico demandado para el pulpeo mecánico. Primero se evalúa el consumo de energía para la mejor práctica para la pulpa de madera y la pulpa de madera termomecánica por separado y después se toma el promedio como el factor de ponderación en este estudio.

Los valores en la literatura para la pulpa de madera van de +0.2 a -1.0 GJ/ton para la industria de madera en Finlandia (Komppa, 1993). De acuerdo a Komppa (1993), aproximadamente 30% de la energía en la molienda puede recuperarse. En consecuencia usamos un valor de -1.5 GJ/ton para el consumo específico de calor y de 5 GJ<sub>e</sub>/ton de consumo eléctrico, que es el valor más bajo reportado para la industria en Finlandia.

De Nilsson *et al* (1995), un estimado para la mejor práctica del consumo específico de energía para la pulpa termomecánica es de alrededor de 5.5 GJ eléctricos por tonelada que se genera. Asumiendo un 50% de recuperación del calor generado (derivado de Nilsson *et al* (1995)), llegamos al consumo específico de calor de -2.75 GJ/ton.

Tomando el promedio de los valores antes mencionados, usamos un consumo específico de calor de -2.1 GJ/ton y un consumo específico de electricidad de 5.3 GJ<sub>e</sub>/ton.

#### Pulpa de madera química

Los datos de la literatura para la demanda específica de calor para el pulpeo químico van de 7.8 GJ/ton en una planta simulada para 1990 (Larson, 1992) a 14 GJ/ton para una planta finlandesa (Komppa, 1993). Una planta simulada se estima que use 7.8 GJ de calor por tonelada en el año 2000 (Nilsson *et al*, 1995). Usamos 10 GJ/ton, que es el promedio de las plantas simuladas para 1980 y 2000 (Nilsson *et al*, 1995).

Para el consumo específico de electricidad, el rango de valores va de 2.1 GJ<sub>e</sub>/ton en una planta de pulpa simulada en 1990 (Larsson, 1992) a 2.7 GJ<sub>e</sub>/ton en una planta simulada para 1980 (Nilsson *et al*, 1995). Usamos 2.5 GJ<sub>e</sub>/ton, que es el promedio de las plantas modeladas para 1980 y 2000 (Nilsson *et al*, 1995).

### **Otras pulpas de madera**

Otras pulpas de madera pueden ser producidas por un número diferente de procesos para los cuales no se encuentran datos en la literatura del consumo de energía. Sin embargo, asumimos que gran parte de "otras pulpas de madera" se producen por procesos mecánicos en los cuales productos químicos son usados para facilitar la ruptura de la madera. Estos procesos son llamados químico-mecánicos o semiquímicos. Los datos sugieren que el consumo específico de electricidad puede ser mayor que en el pulpeo mecánico, dependiendo de la calidad del producto (Komppa, 1993). La tasa de calor recuperado de la energía de la molienda puede ser tan alta como 65% (Nilsson *et al*, 1995). Usamos un consumo específico de calor de -3 GJ/ton, y un consumo específico de electricidad de 6 GJ<sub>e</sub>/ton, asumiendo una tasa de recuperación de calor de 50%.

### **Pulpa de otras fibras**

Pulpa de otras fibras se fabrica de otras fuentes que no son madera. Esta pulpa puede ser producida por un número diferente de procesos para los cuales no hay datos en la literatura del consumo de energía. La cantidad de pulpa de otras fibras en los países de nuestro análisis es muy limitada. Asumimos que se usa el mismo proceso de pulpeo que para otras pulpas de madera, y asignamos los mismos consumos específicos de energía para pulpas de otras fibras.

### **Papel reciclado**

Fibras recicladas pueden reemplazar a la pulpa virgen en la producción de papel y cartón. El proceso de reciclar papel de desperdicio a fibras de pulpa limpia usa energía. Komppa (1993) da un consumo específico de calor de 0.4 GJ/ton y un consumo específico de electricidad de 1.4 GJ<sub>e</sub>/ton de fibra reciclada para Finlandia. Usamos el mismo dato en nuestro análisis como el valor de la mejor práctica disponible.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **Papel periódico**

Los datos de la literatura para el consumo específico de calor en la producción de papel periódico van de 2.3 GJ/ton en una planta simulada para el año 2000 (Nilsson *et al*, 1995) a 5.3 GJ/ton como valor promedio en Alemania en 1973 (Gerken, 1977). De acuerdo a Mulder y Sinon (1994), el consumo específico de energía para periódicos fue 2.8 GJ/ton en 1989. Se asume un valor de 2.5 GJ/ton para el consumo específico de calor de la mejor técnica disponible en 1990. Para el consumo específico de electricidad, se usa un valor de 1.4G<sub>e</sub>/ton, el cual es el promedio de los valores calculados en la simulación para 1980 y 2000 (Nilsson *et al*, 1995).

### **Papel de escritura e impresión**

Los productos de la categoría "escritura e impresión" son muy diversos, al igual que los datos del consumo específico de energía. Los consumos específicos de calor reportados van de 5.5 GJ/ton para papel de revista en Finlandia (Komppa, 1993) a 8.9 GJ/ton para la producción de papel de escritura holandés en 1989 (Mulder y Sinon, 1994). Se usa 7 GJ/ton como el estimado para la mejor práctica disponible en 1990 para la producción de papel de escritura e impresión.

El consumo específico de electricidad va de 1.9 GJ<sub>e</sub>/ton para la producción holandesa de papel de impresión en 1986 (Melman *et al*, 1990) a 3.2 GJ<sub>e</sub>/ton para el papel de impresión recubierto en Finlandia (Komppa, 1993). Se usa 2 GJ<sub>e</sub>/ton para la mejor práctica disponible en 1990.

### **Papel sanitario**

El consumo específico de calor para la producción de papel sanitario va de 5.3 GJ/ton para la industria holandesa en 1986 (Melman *et al*, 1990) a un promedio de 7GJ/ton en la industria finlandesa (Komppa, 1993). Se asume el valor de 5 GJ/ton para la mejor práctica disponible en 1990.

El promedio del consumo específico de electricidad en la industria finlandesa para el papel sanitario fue de 3.6 GJ<sub>e</sub>/ton (Komppa, 1993). Melman *et al* (1990) reportan 2.4 GJ<sub>e</sub>/ton como el mínimo en Holanda. Se usa este valor como el de la mejor práctica disponible para 1990.

## **Papel empaque**

La categoría de "papel de empaque" puede incluir muchos tipos de papel. El consumo específico de calor para la producción de papel de empaque se reporta entre 5 GJ/ton para la industria holandesa en 1986 (Melman *et al*, 1990) y 7 GJ/ton para cajas de cartón en Finlandia (Komppa, 1993). Se usa el valor de 5 GJ/ton como la mejor práctica disponible en 1990.

El consumo específico de electricidad va de 1.3 GJ<sub>e</sub>/ton para algunos productos en Holanda en 1986 (Melman *et al*, 1990) a 2.9 GJ<sub>e</sub>/ton para cajas de cartón en la industria finlandesa de la celulosa y papel (Komppa, 1993). Se usa un valor de 1.5 GJ<sub>e</sub>/ton como el de la mejor práctica disponible.

**NOTA:** La derivación de los factores de ponderación para los índices de producción física fueron extraídos de: Farla, J., et.al., 1995, "Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using phsysical production data", en Energy policy, vol. 25, no. 7-9, p. 746.

## ANEXO 3

### Datos desagregados de la producción mundial de la industria de la celulosa y el papel

**Tabla A3.1 Producción de pulpa y papel. Participación de los principales productos en los países seleccionados para 1988, miles de toneladas.**

País	Pulpas			Papel Reciclado	Papeles				
	Mecánica	Química	Otras		Periódico	Impresión	Empaque	Sanitario	Otro
Alemania	1 660	979	131	5 657	1 028	4 593	3 823	746	712
Brasil	390	3 399	265	1 473	247	1 319	2 183	365	571
Canadá	10 069	12 628	375	1 614	9 970	2 913	3 301	455	0
Corea	158	155	0	2 748	368	745	2 125	142	279
China	402	1 394	11 931	6 632	443	4 462	5 594	700	4 541
Estados Unidos	5 391	44 946	4 253	15 866	5 427	19 588	36 056	4 968	3 548
Finlandia	3 239	5 198	405	373	1 400	4 373	2 343	165	371
Francia	393	1 533	147	2 812	373	2 374	2 897	298	371
Italia	473	80	256	2 414	264	2 208	2 490	264	286
Japón	1 928	7 867	442	12 539	3 067	7 780	10 227	1 281	2 270
<b>México</b>	<b>107</b>	<b>546</b>	<b>294</b>	<b>1 763</b>	<b>420</b>	<b>605</b>	<b>1 845</b>	<b>433</b>	<b>72</b>
Reino Unido	273	0	169	2 573	529	1 159	1 821	439	347
Suecia	2 904	7 111	292	868	2 064	1 660	3 907	289	241

Fuente: FAO, 1996, FAOSTAT; *Pulp, Paper and Paperboard*, [http://apps.fao.org/lim500/agri\\_db.pl](http://apps.fao.org/lim500/agri_db.pl), UN Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.

**Tabla A3.2 Producción de pulpa y papel. Participación de los principales productos en los países seleccionados para 1999, miles de toneladas.**

País	Pulpas			Papel Reciclado	Papeles				
	Mecánica	Química	Otras		Periódico	Impresión	Empaque	Sanitario	Otro
Alemania	1 192	539	0	7 710	1 645	6 756	6 217	954	1 170
Brasil	444	6 521	146	2 448	242	2 070	3 209	571	163
Canadá	11 222	13 368	591	3 179	9 204	5 680	4 582	664	150
Corea	174	413	0	6 194	1 718	1 876	4 358	291	632
China	455	1 695	15 071	18 799	1 077	7 270	16 975	2 291	6 624
Estados Unidos	5 109	48 612	3 888	33 725	6 513	23 221	50 675	6 212	2 155
Finlandia	4 602	6 977	539	642	1 490	7 902	2 970	185	400
Francia	772	1 704	116	5 486	1 099	3 247	4 395	536	326
Italia	366	39	172	4 785	183	2 886	3 945	1 182	372
Japón	1 474	9 315	121	14 853	3 295	11 330	12 285	1 701	2 020
<b>México</b>	<b>42</b>	<b>307</b>	<b>189</b>	<b>2 048</b>	<b>250</b>	<b>692</b>	<b>2 161</b>	<b>660</b>	<b>21</b>
Reino Unido	442	0	75	4 351	1 071	1 745	2 527	718	515
Suecia	3 029	7 407	257	1 922	2 508	2 617	4 527	294	125

Fuente: FAO, 1996, FAOSTAT; *Pulp, Paper and Paperboard*, [http://apps.fao.org/lim500/agri\\_db.pl](http://apps.fao.org/lim500/agri_db.pl), UN Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Glosario de términos

**Fibras hv:** Son fibras largas obtenidas fundamentalmente de pino. Que no son sujetas a un tratamiento mecánico para la obtención de celulosas.

**Fibras cortas:** son aquellas obtenidas de maderas distintas a las coníferas, o de éstas si se ha empleado una transformación a celulosa en proceso mecánico. Tratándose de fibras secundarias (desperdicios de papel) por regla general se referirá a fibra corta.

### Definiciones de fibras virgenes:

*Celulosas:* material fibroso que es el principal componente de la pared celular de todas las maderas, pajas, pastos, etc.

*Celulosa para disolver:* es la pulpa celulósica obtenida usualmente por el proceso de sulfato (ácido) con un contenido de alfa celulosa superior al 85% y con una pureza química tal que la hace apropiada para disolver. Se utiliza para fabricar celulosa regenerada, esteres y esteres de celulosa, así como productos de estas materias, tales como placas, hojas, películas, láminas y bandas, fibras textiles y determinados papeles (papel del tipo utilizado como soporte para papel fotosensible, papel filtro y cartón).

*Pasta:* mezcla de materiales fibrosos y no fibrosos, en suspensión y solución acuosa, en las proporciones adecuadas que se utilizan en la fabricación de papel.

*Pasta mecánica:* se obtiene únicamente por un procedimiento mecánico, es decir, por molido o raspado (desfibrado) de madera previamente descortezada.

*Pasta termomecánica:* se obtiene en refinadores ablandando partículas de madera, después de un tratamiento térmico de la madera con vapor a presión elevada.

*Pasta química de madera al sulfato:* se obtiene por cocción de la madera, generalmente en trozos pequeños, en disoluciones fuertemente alcalinas. O sea, disolución de sosa cáustica modificada. La pasta al sulfato es la más importante hoy en día.

*Pasta química de madera al sulfato:* se utiliza en la fabricación de productos absorbentes (materias de relleno, pañales para bebés) así como para papeles y cartones muy sólidos, que necesitan una resistencia elevada al desgarre, a la tracción y al estallido.

*Pasta químico-termomecánica o pasta semiquímica:* se obtiene por un procedimiento que consta de dos partes, durante las cuales la madera, generalmente en virutas, se suaviza primero por medios químicos en autoclaves y después se refina mecánicamente. Esta pasta contiene gran cantidad de impurezas o materias leñosas y se utiliza esencialmente para la fabricación de papel de mediana calidad. Puede ser blanqueada o sin blanquear.

*Otras pastas fibrosas distintas de la madera:*

- ❖ De bagazo: pasta hecha de los residuos del beneficiado de la caña de azúcar con cualquier método. Puede ser blanqueada o cruda.
- ❖ De paja: pasta hecha de los residuos (paja) del aprovechamiento del fruto del trigo o la cebada mediante un proceso químico.
- ❖ De algodón: pasta hecha de algodón.

#### **Definiciones de fibras secundarias:**

- Fibras secundarias para reciclar: se determinan como tal todas aquellas fibras que ya han sido sujetas de un proceso de fabricación a papel y que previa su recuperación y clasificación, son nuevamente seleccionadas para reprocesarse y fabricar papel nuevamente.
- Desperdicios y desechos de papel o cartón o fibras secundarias: comprenden las raspaduras, recortes, hojas rotas, periódicos impresos, papel periódico sin impresión, y publicaciones, pruebas de imprenta y artículos similares, susceptibles de repulparse para la fabricación de papel nuevo.
- 1ª blanca: recorte y hojas de cuaderno y papel bond blanco sin impresión, libre de contaminantes como: papel carbón, broches plásticos, etc.
- Tarjeta tabular: tarjeta para computadora tipo cartoncillo, nueva o usada con ligera impresión, normalmente de color crema, libre de contaminantes como liga, clips, papel carbón, etc.
- 2ª blanca: recortes y hojas de papel periódico sin impresión, libre de contaminantes como tintas, estopas, gomas, broches, plásticos, papel carbón, etc.

- Archivo blanco: archivos de oficinas, seleccionando las hojas de papel bond blanco, con o sin impresión, de máquinas de escribir y tinta soluble, libre de contaminantes como goma, broches, papel carbón, etc. se tolera un mínimo de clips.
- 2ª pinta: recortes y hojas de papel periódico con una ligera impresión de tinta soluble en las orillas, libres de contaminantes como goma, plásticos, etc.
- Periódicos: papel periódico nuevo, usado o triturado, libre de contaminantes como gomas, plásticos, etc.
- Gris n°1: cartoncillo con cara blanca, con o sin impresión, libre de contaminantes como plásticos, broches, etc.
- Revistas: revistas impresas, trituradas o encuadernadas, en papel periódico con o sin grapa, sin lomo de pegamento sintético y sin contaminantes como plásticos, broches, etc.
- Kraft: cajas de cartón, con o sin impresión, corrugado, nuevas o usadas, así como papel para fabricación de éstas.
- Bolsa n°1: sacos de papel kraft nuevas, defectuosas o usadas de alimento, completamente limpias y sin hilo, sin contaminantes como plásticos, químicos. Forma continua: papel blanco al sulfato o al sulfito manufacturado en formas continuas para computadoras, ligeramente entintados. Debe de estar libre de papel carbón y otros materiales extraños.

Fuente: Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y el Papel, Pagina web, <http://www.cnicip.org.mx>, 2001

### **Definiciones de Eneqía**

Energía de uso final: mide la energía utilizada por cada aplicación final. Es obtenida a través de encuestas para conocer el consumo de energía actual y los datos más importantes del equipo empleado (frecuencia de uso, tamaño, etc.) en hogares, edificios, vehículos e incluso para complejos procesos industriales.

Energía final: es la energía comprada por los usuarios finales, tomando en cuenta las conversiones a otra forma de energía que se lleva a cabo dentro de las instalaciones del usuario final. La manera más fácil de contabilizarla es:

$$\text{Energía final producida} = \text{Energía comprada} - \text{Energía consumida para la conversión dentro de la planta} + \text{Energía producida dentro de la planta}$$

**Energía neta comprada:** es la cantidad neta comprada por los usuarios de un mismo sector. Es la que generalmente se encuentra reportada en las estadísticas nacionales. Sin embargo, no incluye la energía que vende a otros usuarios, por ejemplo, la electricidad autogenerada que se vende a la red eléctrica, subproductos como desechos o gas de alto horno en la industria siderúrgica, etc.

**Energía neta disponible:** es la cantidad de energía actualmente disponible por el usuario, a diferencia de la energía neta comprada, incluye cambios en inventarios y la energía primaria producida por los usuarios, por ejemplo, el bagazo de caña en la industria azucarera.

**Energía primaria:** es aquella que proviene de fuentes primarias de energía, es decir, aquellas que no han pasado por ningún proceso de transformación, como son: el carbón, el petróleo, el gas (asociado y no asociado), la biomasa (leña, bagazo de caña) y las energías renovables (la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica y la hidroenergía). La demanda de energía primaria no puede ser medida, debe ser calculada tomando en cuenta los flujos de energía en el sector energético, a partir del consumo final de energía o de la energía neta comprada. Generalmente el cálculo consiste en sumar al combustible empleado el consumo de electricidad afectado por la eficiencia de conversión de las plantas generadoras (entre 30 y 40%).

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

## Abreviaturas

ATCP	Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y del Papel, A. C.
AVE-PDM2	Método de descomposición paramétrica (2) empleando índices de promedio simple
BNE	Balance Nacional de Energía
CEE	Consumo específico de energía
CEE <sub>p</sub>	Consumo específico de energía primaria
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CNICP	Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FEC	Factor de emisión de carbono
GEI	Gases de efecto invernadero
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INEDIS	Red Internacional de Base de datos de Energía para el Sector Industrial (siglas en inglés, <i>International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector</i> )
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés, <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
LBNL	Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (siglas en inglés)
OIT	Oficina de Tecnologías Industriales (siglas en inglés, <i>Office of Industrial Technologies</i> )
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIB	Producto Interno Bruto
SCN	Sistema de Cuentas Nacionales
USDOE	Departamento de Energía de Estados Unidos (siglas en inglés, <i>United States Department Of Energy</i> )

## Bibliografía

- Ang, B.W., 1995, "Decomposition Methodology in industrial energy demand analysis" en *Energy*, vol. 20, no. 11, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 1081-1095.
- CFE, Informes de Operación de la Comisión Federal de Electricidad, varios años.
- CNICP, *Memoria Estadística de la Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel*, 2000.
- CNICP, Página web, <http://www.cnicp.org.mx/>.
- Comisión para la Cooperación Ambiental, 2001, "*México y el incipiente mercado de emisiones de carbono*", Québec, Canadá.
- Elaahi, A. and Lowitt, H. E., 1988, "*The U.S. Pulp and Paper Industry, An Energy Perspective*", Washington, D. C., U.S. Department of Eenergy.
- EPA, Environmental Protection Agency, 1993, "*Handbook on Pollution Prevention Opportunities for Bleached Kraft Pulp and Paper Mills*", Environmental Protection Agency. 600R93098.
- EPA, Environmental Protection Agency, 1996, "*Climate Wise*". <http://www.epa.gov/climatewise/>.
- FAO, 1996, FAOSTAT; *Pulp, Paper and Paperboard*, <http://apps.fao.org>, UN Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.
- Farla, J., et.al., 1995, "*Energy efficiency developments in the pulp and paper industry; A cross country comparison using phsysical production data*", en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7-9, p. 746.
- Giraldo, L., and Hyman, B., 1994, "*Energy Consumption Patterns in the Paperand Paperboard Industry*", Seattle, W. A.: Departament of Mechanical Engineering.
- Grant T. J., 1985, "*Patterns of fuel and Energy Consumption in the U.S. Pulp and Paper Industry 1972-1984*", American Paper Institute, New York, USA.
- INEGI, 1997, *Sistema de Cuentas Nacionales de México, Cuentas de Bienes y Servicios 1988-1995*, Tomo II, México.
- IPCC, 1997, Greenhouse Gas Inventory Workbook, 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jaccard, M., Willis Enterprises Associates, 1996, "*Energy Conservation Potential in Six Canadian Industries*".
- Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999, *International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector*, Berkeley, California, Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBID-2297).
- Lenz H., 1990, "*Historia del papel en México y cosas relacionadas 1525-1950*", Editorial Porrúa, México.

- Marin J., 1991, "*Diagnósticos Energéticos en una planta de Celulosa y papel*", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.
- Martin N., Aglani N., Einstein D., Khrushch M., Worrel E., Price L. K., 2000, "*Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the U. S. pulp and paper industry*", Environmental Energy Technologies Division, julio, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Ministerio de Industria y Energía, *Técnicas de conservación energética en la industria tomo II (ahorro en procesos)*, Comisaría de la Energía y Recursos Minerales, Centro de Estudios de la Energía, Madrid, 1982.
- Office of Industrial Technologies (OIT), 2001, <http://www.oit.gov/bestpractices>.
- Olmedo E., 2000, "*Reducción de costos en la industria del papel*", Reunión Anual de la Asociación Mexicana de Técnicos de las Industria de Celulosa y el Papel, A. C., México D. F.
- Olmedo E., 2001, "*Evolución de las fábricas de papel en México*", conferencia impartida para la Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y el Papel.
- Ozawa, L., 2000, "*Análisis del consumo de energía en el sector industrial mexicano y comparaciones internacionales: industrias siderúrgica y cementera*", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.
- Petroleos Mexicanos, 1987, "*Perfiles Energéticos Industriales No. 3: Consumo de Energía en la Industria de la Celulosa y el Papel*".
- Phylipsen, G.J.M., et. al., 1998, *Handbook on International Comparisons of Energy Efficiency in the Manufacturing Industry*, Departamento de Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad de Utrech, Utrecht, Holanda.
- Phylipsen, D., 2000, "*International Comparisons & National Commitments: Analysing enrgy and technological differences in the climate debate*". Universidad de Utrech, Utrecht, Holanda.
- Pulp and Paper International, julio 1999.
- Revista Investigación y Técnica del Papel, Num 144, 2000, Madrid. España .
- Schipper, L., and Meyers, S., with Howard, R. B. and Steiner, R., 1992, "Energy efficiency and human activity; past trends, future prospects", Cambridge University Press, Cambridge.
- Secretaría de Energía, 1997, *Balance Nacional de Energía 1996*, México.
- Secretaría de Energía, 2000, *Balance Nacional de Energía 1999*, México.
- Sheinbaum, C., y Rodríguez, L., 1997, "*Recent trends in Mexican industrial energy use and their impact on carbon dioxide emissions*", en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7-9, p. 825.
- Worrell, E., 1996, *Potentials for Improved Use of Industrial Energy and Materials*, tesis doctoral, Departamento de Sociedad, Ciencia y Tecnología, Universidad de Utrech, Holanda.

- Worrell, E. y C. Moore, 1997, "Energy efficiency and advanced technologies in the Iron and Steel industry" en *1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry Proceedings*, Estados Unidos.
- Worrell, E., L. Price, Nathan Martin, Jacco Farla and Roberto Schaeffer, 1997b, "Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators" en *Energy Policy*, vol. 25, no. 7 al 9, Elsevier Science, Gran Bretaña, p. 727-744.