

Impacto de la eficiencia en el consumo de biomasa en el sector celulosa chileno

R. Loaiza^{1*}, J. Ortiz-Cañavate², M. Solar¹ y O. Farias³

¹ Universidad Austral de Chile. P.O. Box 567. Valdivia. Chile

² Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid. España

³ Universidad de Concepción. P.O. Box 160-C. Concepción. Chile

Resumen

En base a estadísticas oficiales, y datos obtenidos directamente de las empresas del sector celulosa Kraft, se exponen las características de biomasa como desechos energéticos utilizados por el sector. Se identifican volúmenes, fuentes, costos y se obtienen indicadores de Consumo Específico de Energía, por tipo de energía, y el impacto de la eficiencia en la generación de electricidad.

Los aspectos más relevantes del estudio reflejan una inadecuada gestión energética e incorporación de tecnología sólo con objetivos de aumento físico de la producción, sin tener en consideración de que toda energía ahorrada en procesos es posible venderla como electricidad.

El impacto de un uso a menores niveles de eficiencia, en el consumo de energía, significó en el año 2002 menores ventas de excedentes de electricidad del orden de un 85%.

Palabras clave: celulosa, biomasa, gestión energética, eficiencia energética, cogeneración.

Abstract

Impact of the efficiency in the consumption of biomass in the Chilean cellulosous sector

On the basis of official statistics, and data obtained directly of the companies of the sector cellulose Kraft, there are shown the characteristics of the use of biomass like energetic waste matter used by the sector. There are identified volumes, sources, costs and there are obtained Specific Consumer's indicators of Energy, for type of energy, and the impact of the efficiency in the generation of electricity.

The most relevant aspects of the study reflect an inadequate energetic management and incorporation of technology only with objectives of physical increase of the production without an exact conscience that all energy saved in processes is possible to sell it as electricity.

The impact of a use at minor levels of efficiency, in the consumption of energy, meant for the year 2002 a reduction of sales of surpluses of electricity of about 85%.

Key words: cellulose, biomass, energetic management, energetic efficiency, cogeneration.

Introducción

Las estadísticas nacionales, para las fuentes energéticas (tanto del Instituto Nacional de Estadísticas como de la Comisión Nacional de Energía, en Chile), son muy difíciles de desagregar, para analizar conjuntos de empresas con procesos y producciones similares. Esto es, incluso, común en los informes a nivel de organismos especializados en análisis sectoriales como ASPAPEL en España o INFOR (Instituto Forestal) en Chile.

El no poder disgregar la información estadística, para poder efectuar agrupaciones de empresas con procesos y producciones similares, impide obtener indicadores de eficiencia en el consumo de energía que permitan evaluación de estrategias, intercambio de experiencias, revisión de desempeño y análisis a nivel de empresas. Esto también dificulta la evaluación de programas, formulación de metas y bases de planificación, a nivel nacional, aspectos posibles si se dispone de información en aquellos sectores industriales estructuralmente similares, que hacen viable entregar posicionamientos relativos.

Hay que tener presente que la metodología contempla que la intensidad o eficiencia energética, en-

* Autor para la correspondencia: rloaiza@uach.cl

Recibido: 12-12-05; Aceptado: 14-05-07.

tendida como cantidad de energía requerida por unidad de producción o actividad humana, puede expresarse en términos financieros así como también en términos físicos, lo que conduce a los dos tipos de indicadores: Indicadores de Intensidad o Económicos (o monetarios) e Indicadores Físicos o Consumos Específicos (APEREC, 2000).

En el cálculo de la eficiencia energética debe considerarse que en un sector, cada empresa, tiene niveles de consumo de energía diferentes según sus procesos productivos: de acuerdo a su nivel tecnológico, capacidad productiva y tipo de productos; pero siempre es posible hacer una diferenciación al interior de cada uno de ellos que, finalmente, se refleja en la eficiencia de la gestión del proceso (Phylipsen *et al.*, 1998).

En este contexto el presente trabajo pretende entregar una apropiada valorización de la incidencia del consumo de energía y un marco de referencia, mediante indicadores de eficiencia energética, que permita a cada empresa determinar su posicionamiento relativo y con ello las potencialidades de mejoramiento y adecuación competitiva de su gestión en este ámbito, en el Sector Celulosa Kraft en Chile.

Para la adecuada utilización de la información que se obtiene mediante indicadores de eficiencia, y las características del consumo de energía, es necesario complementarlos con sus factores causales (ingreso, precios, políticas, información, actitudes...); sus factores condicionantes (tecnología, estructura, comportamiento, producción, clima...) y sus consecuencias (costos, seguridad, medio ambiente...), lo cual se consigue mediante las variables explicativas para su análisis conjunto con los indicadores de eficiencia energética.

En Chile, el uso de biomasa representa el 16% del consumo total de energía primaria. Este alto volumen se ve agravado por la ineficiencia en su uso. En el campo empresarial, el uso de los residuos del aprovechamiento forestal y las actividades de transformación primaria para la generación de energía es un área poco desarrollada (CNE, 2004).

La actividad con mayor aporte de biomasa corresponde a la relacionada con la Industria de la Madera en la que se encuentran, en especial, los Grupos: 3311 (Aserraderos, talleres de cepillado y otros talleres para trabajar la madera) y 3411 (Fabricación de pulpa de madera, papel y cartón), de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas (CIU) de las Naciones Unidas (INE, 2004)

En estos grupos, el sector correspondiente a la fabricación de pulpa o celulosa, que no sólo se caracte-

riza por sus altos volúmenes de generación de biomasa sino además por su gran consumo de energía, en calor y electricidad necesaria en sus procesos utilizando para ello sus propios residuos de biomasa.

Para la producción de celulosa, el consumo de energía en calderas tiene por objetivo entregar vapor de alta presión a turbogeneradores, que generan electricidad y calor a más baja presión requerido por los procesos de cocción de la madera necesaria para producción de celulosa. Esta cogeneración de calor y electricidad consigue altos rendimientos en el uso de las fuentes energéticas.

Para la elaboración de celulosa, en la preparación de la materia prima correspondiente a madera de pino o eucaliptos, se generan serrín, cortezas y madera no pulpable, que corresponden a los desechos de biomasa que se utilizan como combustible en calderas de «poder» (caldera auxiliar, alimentada con Desechos de Madera, para complementar la línea de vapor de alta presión). Al mismo tiempo, la separación de la fibra de madera mediante la disolución de la lignina (elemento de unión de las fibras) que se realiza en un digestor en presencia de vapor y Licor Blanco (solución alcalina de sosa cáustica y sulfuro de sodio) crea como desecho el denominado Licor Negro en concentraciones del 18 al 20%, principalmente de lignina y desechos orgánicos. El Licor Negro una vez concentrado, en porcentajes del orden del 70-80% en sólidos, es utilizado por su poder calorífico, como fuente energética en la caldera llamada «recuperadora» (o caldera principal) en el proceso de fabricación de celulosa (o pulpa).

Este autoabastecimiento de fuentes energéticas, dependiente de la eficiencia alcanzada en su utilización, en la producción conjunta de electricidad y calor, permite un rango de excedentes en electricidad que el sector comercializa a través del mercado eléctrico.

Si bien en los últimos años la venta de electricidad por parte del sector celulosa ha crecido enormemente (Loaiza *et al.*, 1999) esto es fundamentalmente debido a la incorporación de nuevas plantas, que en sus proyectos consideran este factor de autosuficiencia y venta de excedentes de electricidad o reinversiones con este mismo objetivo en las ya existentes, y no porque el sector aumente su cogeneración con sus instalaciones iniciales.

En general la literatura analiza tanto la producción de calor como la de electricidad a nivel de plantas de cogeneración individuales, pero el presente trabajo se enfoca a determinar las características del consumo de

energía en el total de las plantas ya existentes de celulosa Kraft en Chile y el efecto de la eficiencia en el consumo de energía que se traduce en la venta de excedentes de electricidad cogenerada.

En el caso del sector celulosa la disponibilidad de fuentes energéticas propias (biomasa, desecho de la fabricación de celulosa) satisface plenamente los requerimientos de calor y, dependiente de la tecnología utilizada, generan la electricidad requerida en sus procesos y excedentes para su venta.

El proceso energético para una planta, o para el sector en su conjunto, se puede resumir en la figura 1 que presenta los requerimientos de energía eléctrica y calor útil para el proceso productivo

Este diagrama energético incluye dos rectas que contienen los puntos indicados como A y D, y como B y C. Estas dos rectas corresponden a dos tecnologías de cogeneración con relación E/C (relación de energía eléctrica y calor útil), mayor y menor que el punto de funcionamiento, en este caso para el sector celulosa Kraft.

Los puntos anteriormente citados pueden resultar puntos de funcionamiento de la planta de cogeneración. Con base a la Figura 1, común para cualquier sistema de cogeneración, se pueden presentar cuatro casos.

El punto «A» satisface la demanda eléctrica pero no llega a producir la energía térmica requerida, que en un sistema común se consigue realizando un consumo extra de combustible aprovechando el contenido de oxígeno de los gases procedentes de la combustión, para así elevar la temperatura de éstos y poder tener un potencial energético mayor, para la producción de calor útil, o bien, produciendo la energía necesaria mediante un sistema convencional de producción como puede ser una caldera.

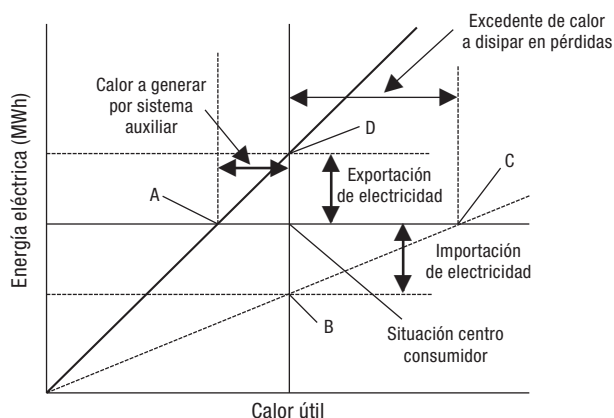


Figura 1. Diagrama energético del sector celulosa.

En el caso de una planta de celulosa el sistema está configurado con dos calderas que alimentan primero un turbogenerador, una principal alimentada con Licor Negro y una segunda, cuya función es generar el vapor requerido por variaciones de la demanda de la planta, absorbiendo las fluctuaciones a partir de la combustión de desechos de madera y petróleo. Este sistema hace que en estas condiciones el punto de funcionamiento tienda a ubicarse en la recta BD.

El caso extremo de la situación descrita lo representa el punto «B» en el que se satisface la demanda térmica pero se necesita comprar electricidad de la red. Este punto de funcionamiento tampoco se da en el sector celulosa habida consideración a que el sector dispone de fuentes energéticas superiores a los requerimientos del proceso.

El punto «C» es el caso más indeseable ya que, aunque la demanda eléctrica está completa, se produce mayor calor útil que lo que el centro consumidor demanda, por lo que resulta que, si no se vende esta energía térmica (situación en la práctica inviable), resulta una pérdida de energía. Esta situación se presenta cuando la tecnología de calderas y turbogeneradores no están debidamente dimensionadas.

El punto «D» se obtiene el calor útil o energía térmica necesaria con una cantidad de electricidad mayor a la demandada, con lo que se puede vender electricidad a la red.

El sector a partir del año 1990-94 tiene sus puntos de operación en la parte superior de la recta BD y, como se comprobará en el presente estudio, sus excedentes de electricidad dependen fundamentalmente de la eficiencia en el uso de combustibles y electricidad en sus procesos.

Como resumen de lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tiene por objetivo entregar la cuantificación, características y causas del consumo de energía del sector celulosa Kraft en Chile, evaluando el impacto que su uso eficiente tiene en la cogeneración eléctrica del sector.

Material y Métodos

Fuentes de información

Los datos utilizados en el presente estudio se circunscriben al sector celulosa del Grupo 3411: «Fabricación de pulpa de madera, papel y cartón», de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU),

de todas las Actividades Económicas, establecida por las Naciones Unidas (UN) obteniéndose información del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Banco Central de Chile (BC), Comisión Nacional de Energía (CNE), Instituto Forestal (INFOR), complementada con información secundaria, proveniente de fuentes tales como; textos, publicaciones y revistas especializadas, donde se explican los conceptos y se realiza un diagnóstico de la situación de la industria de la celulosa.

El estudio, basado en las fuentes anteriormente, señaladas analiza la situación del Sector Celulosa Kraft para los años 1990-2002 que produjo sobre 1.500.000 toneladas de celulosa y sólo no consideró la planta Licancel S.A. con 95.000 Adt/año

El análisis los datos económicos se deflactaron, en dólares norteamericanos al año 2000 (USD), los consumos de energía en Megajulios (MJ) y la producción de celulosa en Adt (toneladas de celulosa seca al aire).

Valoración de los datos energéticos

Los datos, de las fuentes energéticas, se expresan en las unidades, densidades y poderes caloríficos que se indican en la Tabla 1.

Los valores de electricidad, desechos de madera y petróleo son los considerados por la comisión Nacional de Energía en Chile y publicados en su página web: www.cne.cl.

Los valores del poder calorífico del Licor Negro corresponden al promedio ponderado de la información directamente suministrada por las plantas.

Fundamentos metodológicos para el Cálculo de Índices Energéticos

Los indicadores de eficiencia energética se obtienen al vincular el consumo de energía con el valor

Tabla 1. Unidades y poder calorífico de las fuentes energéticas

	Unidad	Energía (en MJ)
Electricidad	MWh	3.600 MJ/MWh
Petróleo	m ³	41.103,9 MJ/m ³
Desechos de madera*	Toneladas (t)	10.341,4 MJ/t
Licor Negro**	m ³	9.378,4 MJ/m ³

* Base a 50% de humedad. ** Base al 70% de concentración de sólidos.

agregado (Intensidad Energética) y la producción (Consumo Específico de Energía).

El desarrollo de índices de eficiencia energética se basa en la siguiente identidad básica:

$$E = A \times \left(\frac{E}{A} \right) = A \times \Omega \quad [1]$$

donde «E» es la energía usada expresada en Megajulios (MJ), y «A» es el nivel de actividad, expresada por el Valor Agregado de la Producción (VA) sectorial, o por unidades físicas de producto (t). Por tanto, Ω es el indicador de eficiencia energética promedio por unidad de actividad generada por el sector en análisis ($MJ/VA =$ Intensidad Energética en unidades económicas o en unidades físicas, $MJ/t =$ Consumo Específico de Energía).

Expresado en términos de índices respecto del año base (identificado por subíndice «0»), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{A \times \Omega}{A_0 \times \Omega} \quad [2]$$

Los índices tecno-económicos, como es el caso del de Consumo Específico, se utilizan cuando los análisis se realizan a niveles suficientemente desagregados (como es el caso del presente trabajo, sobre el sector celulosa Kraft, en específico) y relacionan la energía consumida con niveles de actividad (de uso final) expresados en unidades físicas (toneladas de celulosa en este caso).

Este tipo de indicador, permite resolver algunos problemas asociados a los indicadores económicos. En efecto, el nivel de desagregación mediante el cual se construyen estos indicadores permite eliminar las distorsiones asociadas a cambios en las estructuras productivas.

Al realizar comparaciones, se requiere tener presente que este indicador se asocia a procesos de producción más que a productos, así por ejemplo, no es posible comparar la eficiencia energética relativa de la producción de una tonelada de papel producida a partir de papel reciclado, contra otra producida a partir de celulosa.

Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética

Para determinar el efecto y consecuencias de la eficiencia energética en el consumo de energía del sector, se desarrolla un modelo que entrega la cantidad de ener-

gía eléctrica factible de cogenerar mediante la liberación de energéticos destinados a calor para procesos.

Bajo este enfoque la ecuación a desarrollar, o función objetivo, buscará determinar el máximo de la energía eléctrica para venta ya que la eficiencia en el consumo de energía, en procesos de fabricación, se traducirá en mayor generación de electricidad para su venta o simplemente el venteo del exceso de calor (o entrega de calor a la atmósfera) por la imposibilidad practica de venta de excedentes de calor.

Consecuentemente las variables de decisión, en unidades físicas, corresponderán a los metros cúbicos (m³) de Petróleo, toneladas de desechos de madera (DHM) y metros cúbicos (m³) de Licor Negro (LN). Estas variables se presentan en el modelo en unidades energéticas (MJ) para lo cual las unidades físicas (t y m³) de cada una de ellas se multiplicaran por sus poderes caloríficos entregados en la Tabla 1.

La disponibilidad de las fuentes energéticas a partir de desechos de la fabricación de celulosa (LN y DHM), estará fundamentalmente relacionada con las toneladas de celulosa producidas.

En relación con los desechos de madera, por su bajo costo relativo con respecto al petróleo, la generalidad de las plantas adquieren desechos desde empresas madereras. Consecuentemente, el volumen a quemar, dependerá de sus propios desechos generados en el tratamiento de la madera para producción de celulosa y la disponibilidad de abastecedores externos.

Las dos fuentes energéticas anteriormente mencionadas, tienen un costo marginal habida consideración de los costos alternativos que habría que incurrir, de no ser quemados, para cumplir las exigencias ambientales.

El consumo de combustibles para la generación de calor y vapor para procesos vendrá dado, para cada año en estudio, por:

$$E_{\text{Comb.Tot}} = CEE_c * \text{Adt} \quad [3]$$

donde

$E_{\text{Comb.Tot}}$ = Energía total procedente de los combustibles (en MJ), consumida en las calderas para los procesos de fabricación de celulosa.

CEE_c = Consumo Especifico de Energía para combustibles (DHM, LN y Petróleo), por tonelada de celulosa (MJ/Adt).

Adt = Producción total, en toneladas de celulosa seca al aire.

El total de los desechos de madera y Licor Negro (en MJ), generados como desechos del proceso pro-

ductivo, será función de las toneladas de producción. Consecuentemente la disponibilidad total de energía, para alimentar las calderas, será la suma de los desechos generados (LN y DHM), el petróleo y desechos de madera adquiridos a terceros, que se expresa como:

$$E_{\text{Disp}} = (X_1 * \text{Adt} + X_2 * \text{Adt} + X_{21} + \text{Pet}) \quad [4]$$

E_{Disp} = Energía total disponible para la producción de calor y vapor.

X_1 = Energía correspondiente al Licor Negro generado, en MJ por tonelada de celulosa producida.

X_2 = Energía correspondiente a los Desechos Húmedos de Madera, en MJ por tonelada de celulosa producida.

X_{21} = Energía correspondiente a los Desechos Húmedos de Madera comprados, expresados en MJ totales.

Pet = Energía correspondiente al petróleo, en MJ totales.

Si se dispone del Consumo Especifico de Energía alcanzable según la mejor tecnología, la de un país de referencia o en el caso del menor consumo alcanzado históricamente por el sector se puede determinar el volumen de energía posible de liberar en cada caso y la potencialidad de su utilización para cogenerar energía eléctrica.

Al multiplicar esta energía, disponible, por el factor de eficiencia del turbo generador se obtiene la electricidad generada en MJ. Al restar la energía eléctrica consumida en los procesos de fabricación de celulosa (CEE_c del consumo de electricidad en procesos por tonelada de celulosa producida) se obtiene la función objetivo buscada y que viene dada por:

$$\text{F.O.: } \{ [(X_1 * \text{Adt} + X_2 * \text{Adt} + X_{21} + \text{Pet}) - CEE_c * \text{Adt}] * \eta_e - CEE_e * \text{Adt} \} \quad [5]$$

donde

η_e = Rendimiento, o factor de eficiencia, del turbogenerador.

CEE_e = Consumo Especifico de Energía eléctrica consumida por tonelada de celulosa (MJ/Adt).

La capacidad de las calderas y la eficiencia de los turbogeneradores condicionan la cantidad de desechos de madera y petróleo que se puede comprar, por lo que estas dos variables establecen restricciones que en el caso de Chile, la tecnología empleada, limitan el aumento de desechos de madera en un 15% de su auto producción y en petróleo un 20% máximo de utilización, sobre los niveles actuales.

Resultados

La aplicación del modelo requiere conocer las fuentes, tipos y forma de los consumos energéticos del sector que permitan en primera instancia validar el modelo y, sobre ello, determinar el potencial de ahorro de energía mediante el mejoramiento de la eficiencia energética y su impacto sobre la generación y venta de energía eléctrica.

A partir de las fuentes de información, valorización de los datos energéticos y los fundamentos para el cálculo de los Índices Energéticos, entregados en el apartado correspondiente a Material y Métodos, se entregan los resultados y características del consumo de energía del sector, durante los años en estudio, que permiten visualizar el impacto de la eficiencia en la generación y venta de energía eléctrica.

Consumo de combustibles en el sector la celulosa

La energía consumida por el sector, viene impuesta por las características del proceso y equipos, los cuales son similares para todas las plantas en estudio, de análogo nivel tecnológico atendido el hecho de las permanentes inversiones en el sector.

La producción de celulosa Kraft varió de 374.378 toneladas en 1990 a 1.496.864 toneladas en el 2002, lo que significa prácticamente cuatro veces la producción de 1990 por la incorporación de nuevas plantas e inversiones en el sector.

Destaca el aumento en el uso del Licor Negro (de 645.942 a 2.698.002 m³) directamente proporcional al aumento de producción, que reemplaza a los desechos de madera, los cuales se mantuvieron en un rango acotado entre las 260.000 a 360.000 toneladas a partir de 1995 y hasta el 2002, último año en estudio, a pesar del aumento señalado en la producción pero que fue contrarrestado con una menor compra de desechos de madera a proveedores externos y un mejor tratamiento de la madera para su máxima utilización.

En lo referente al consumo de electricidad, ésta aumentó de 234.893 MWh a 667.125 MWh (2,84 veces entre 1990 y el 2002) consecuencia de la mayor producción de celulosa. Si se toma el consumo entre 1999 y 2003, que presenta características de régimen con mayor estabilización en los consumos y producción, la electricidad varía en el orden de los 590 a 660 GWh no guardando una clara correlación con la producción,

lo que infiere una mayor eficiencia en su consumo.

La participación del petróleo que fluctuaba, hasta el año 1996, entre aproximadamente 30.000 a 50.000 m³, a raíz de la crisis en la generación hidroeléctrica por sequía, pasa a incrementarse a niveles de 70.000 a 90.000 toneladas requeridas para mantener la generación de electricidad, a regímenes de mayor estabilidad, requerida por la incorporación del sector en el mercado eléctrico.

En la Figura 2 se entrega la variación del consumo físico de las fuentes energéticas por tonelada de celulosa producida. Se observa como el consumo de petróleo presenta un aumento producto de paralizaciones de plantas, restricciones del suministro eléctrico por menor generación hidroeléctrica (por efecto de la crisis energética ocurrida el año 1998 en el sistema interconectado) y una disminución en los precios promedio reales, factores que en conjunto ocasionaron un mayor consumo de petróleo.

Hay que considerar que tanto el Licor Negro como los desechos de madera son desechos que deben ser tratados por exigencias ambientales y su combustión representa un método económico para ello. Bajo esta consideración es muy difícil cuantificar adecuadamente su valor real como combustibles.

El efecto de la falta de registros confiables de costos por desechos se trata de obviar al considerar dos figuras: la Figura 3 en la que no se considera el costo de la electricidad comprada al sistema eléctrico, y en la Figura 4 en la que se cuantifica el consumo total de

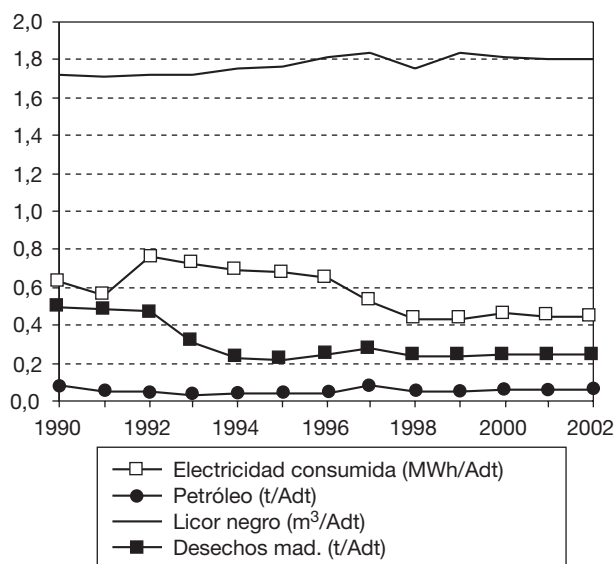


Figura 2. Consumo por Adt de las distintas fuentes energéticas.

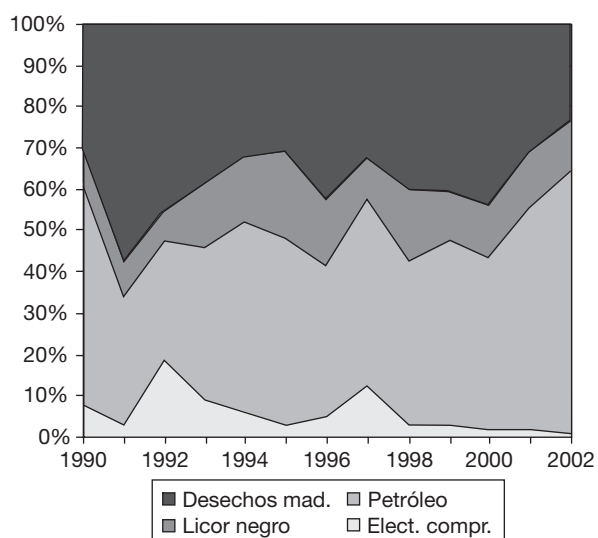


Figura 3. Evolución porcentual económica de las distintas fuentes energéticas.

electricidad (incluida la cogenerada) a costo de compra al sistema eléctrico.

Estas figuras se entregan sólo con el interés de visualizar tendencias que permitan comprender la evolución que, para las empresas, representa el ítem energía en el total de sus costos.

Estas dos figuras permiten tener una visión del costo real aproximado de la electricidad consumida, y su efecto sobre el costo energético total, si ella tuviera que comprarse en su totalidad, si bien a los valores de

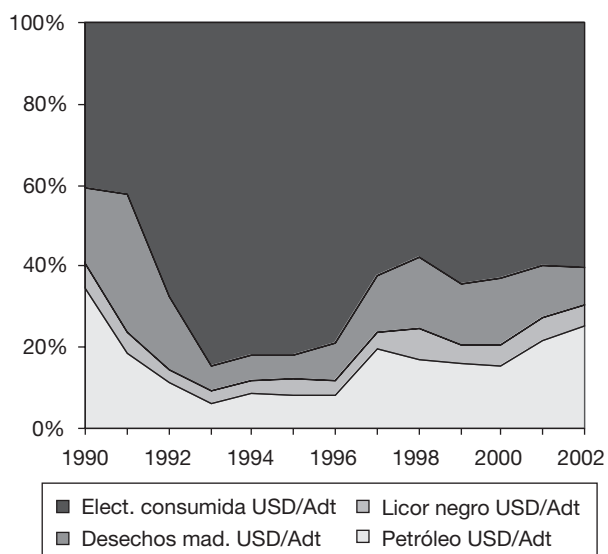


Figura 4. Evolución porcentual económica de las fuentes de energía considerando el total de la electricidad consumida a precio de compra.

Licor Negro y desechos habría que restar el costo adicional por los aumentos de combustión exigidos para la cogeneración.

El costo total, por consumo de petróleo, ha aumentado consistentemente en los últimos años, por el alza que este combustible ha experimentado, a pesar de no aumentar en igual proporción los volúmenes consumidos.

A continuación se efectúa un análisis detallado de la participación de la electricidad en particular y su evolución para la serie de tiempo analizada.

Consumo de electricidad

El consumo de electricidad fue obtenido de la diferencia producida al sumar la electricidad comprada a las generadoras y su cogeneración, menos la electricidad vendida al sistema interconectado o a clientes libres. Eso sí, se debe considerar que hay traspasos de energía eléctrica entre empresas pertenecientes al mismo grupo.

En la Figura 5 se presenta la electricidad vendida y comprada en líneas, la electricidad generada en área y la electricidad consumida en barras.

Como se explicó anteriormente la variación que se muestra en los años 1997-98 es producto de la crisis eléctrica y de las paradas de plantas por reparaciones y mantenciones. Esta figura demuestra la importancia dada por las empresas a la venta de energía a partir del

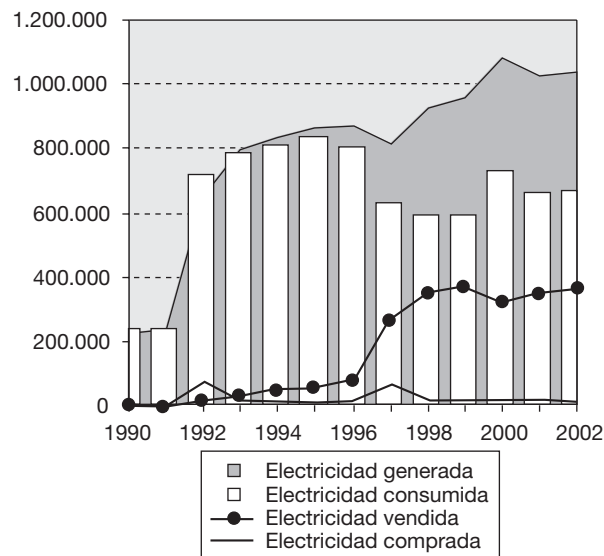


Figura 5. Evolución de energía eléctrica en MWh.

año 1996, disminuyendo al mínimo la compra de electricidad a partir de 1998, sólo para las puestas en marcha después de interrupciones producto de fallas mayores o mantenimiento de calderas.

Se observa que hasta el año 1993 el sector era prácticamente deficitario en su abastecimiento eléctrico. Entre 1994 hasta 1996 presento una venta de energía marginal. Esto se revirtió fuertemente a partir de 1997 con reducciones en el consumo y consecuentes aumentos importantes en la venta. Este cambio en parte fue consecuencia del período de sequía del país y consecuencia de la conveniencia de asegurar el autoconsumo y, en lo posible, la venta de excedentes por el impacto en las utilidades que incentivaron las inversiones requeridas para el logro de estos objetivos. Si bien se observaron leves aumentos en el consumo promedio, estos no fueron tan notorios como la variación promedio en los precios y en los costos, ya que la tendencia durante el fin de la década de los 90' fue a la baja de los precios. Si bien la crisis eléctrica (en el sistema interconectado) del año 98 significó la venta en condiciones más ventajosas, la energía en Chile ha bajado sostenidamente durante el periodo en estudio remontando levemente esta tendencia en los últimos años a consecuencia de la casi nula inversión en el sector eléctrico.

Indicadores de eficiencia energética

En la casi generalidad de la literatura los indicadores de eficiencia, entendidos como el cociente entre la cantidad de energía requerida por unidad de producción o actividad humana consideran en la evaluación del consumo de combustibles su volumen físico total. Esta evaluación es discutible habida consideración de que parte del total de la energía, suministrada por los combustibles, se utiliza en generación de electricidad y por consiguiente se presenta una doble cuantificación de la energía consumida como fuente energética para producir calor para procesos y electricidad que a su vez es consumida en ellos.

Consecuentemente reviste importancia disponer de indicadores de eficiencia que permitan evaluación de estrategias, intercambio de experiencias y revisión de desempeño y análisis a nivel de empresas como también evaluación de programas, formulación de metas y bases de planificación, a nivel nacional. Para ello es fundamental que los indicadores de eficiencia representen la energía efectivamente consumida en cada

proceso: fabricación de celulosa y cogeneración de energía eléctrica.

Los estudios realizados (tanto a nivel nacional como internacional) presentan generalmente indicadores de Intensidad Energética para el sector Celulosa y Papel en que se tratan en conjunto los valores agregados, procesos, precios y rentabilidades distintas de dos industrias que si bien son complementarias, a su vez son diferentes por ser la celulosa una materia prima para la industria del papel, la cual entrega un producto elaborado.

En el caso del Valor Agregado, el sector celulosa, está fuertemente condicionado por su precio internacional. El indicador de Intensidad Energética, en consecuencia, no entrega las tendencias o comportamiento de largo plazo de la eficiencia.

Otro aspecto a considerar, y que influye tanto en el indicador de Intensidad como de Consumo Específico, es que las estadísticas de cada país entregan los consumos totales, que en el caso de los sectores con cogeneración no se discriminan los consumos de calor para procesos y los consumos para generación de electricidad, por lo que los indicadores se ven sobre evaluados por este concepto (CEE, IE de electricidad y combustible) agravándose tanto por la canasta de productos en el Sector Papel (diferentes tipos y precios de productos), como por los precios fluctuantes a nivel de países, (en lo que dice relación con los indicadores de Intensidad), influencia de las economías de escala y nivel de cogeneración, en el caso de los consumos específicos.

A este último aspecto habría que agregar los distintos tipos de Celulosa producido en cada país, ya que los consumos energéticos difieren sustancialmente entre la producción de celulosa mecánica y los distintos tipos de celulosa química, por lo cual, estos indicadores, sólo tienen un sentido referencial pero no de utilidad práctica.

Por lo anterior el análisis aquí expuesto es realizado sobre un sector específico, con un producto homogéneo en cuanto a sus procesos, lo cual permite determinar posicionamientos relativos y analizar con mayor detalle los comportamientos particulares, o del sector en general, en lo referente al Consumo Específico de Energía.

El disgregar los consumos de energía destinados a cogeneración, teniendo en cuenta el importante aumento de la electricidad vendida por el sector, se considera un aspecto relevante en la determinación de los indicadores de eficiencia y su discusión con sus variables explicativas.

Consumo Específico de Energía

Los indicadores calculados para la electricidad y combustibles, expresados como la relación entre los valores de energía consumida y producción de cada año, se presentan en la Figura 6 en la cual las discontinuidades presentes en 1990-92 son motivadas por la incorporación de dos nuevas plantas. En el año 1997-98 las variaciones son producto del consumo adicional de petróleo por paradas de plantas, la crisis del sistema eléctrico ya comentada y reemplazo de desechos de madera por Licor Negro.

Si se efectúa un análisis comparativo, con respecto a la variación experimentada en los volúmenes de producción e inversiones, con el CEE en forma separada para electricidad y combustibles, según se expone en la Figura 7, se puede observar que a pesar del incremento constante de la producción (casi un 400%) el consumo energético por tonelada disminuyó un 29%, en el caso de la electricidad y en los combustibles en un 11%, con respecto al consumo del año 1990.

Si se analiza la Inversión, considerada como saldo del activo fijo (que representa la inversión total), se observa que no ha tenido un impacto en el consumo energético y se ha centrado fundamentalmente en aumento de la producción. Sin embargo si se desglosa este activo fijo, y se analiza solo la inversión en máquinas y equipos, se observa una mejor correlación que se hace mucho más evidente al desarrollar mode-

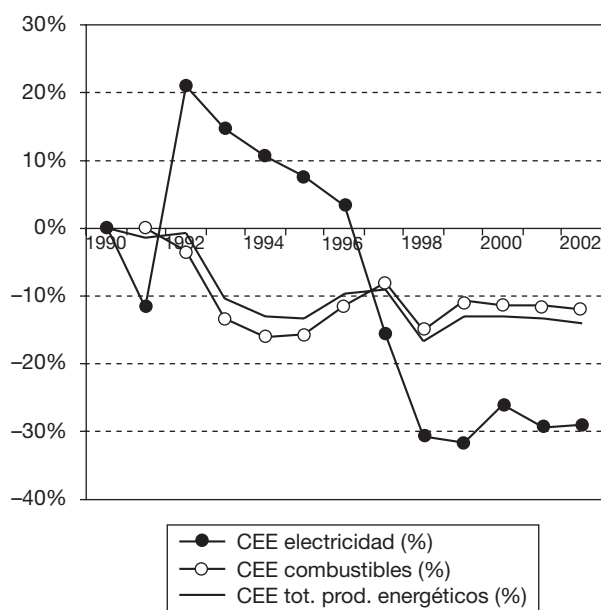


Figura 6. Consumo específico de energía, base 1990 = 0.

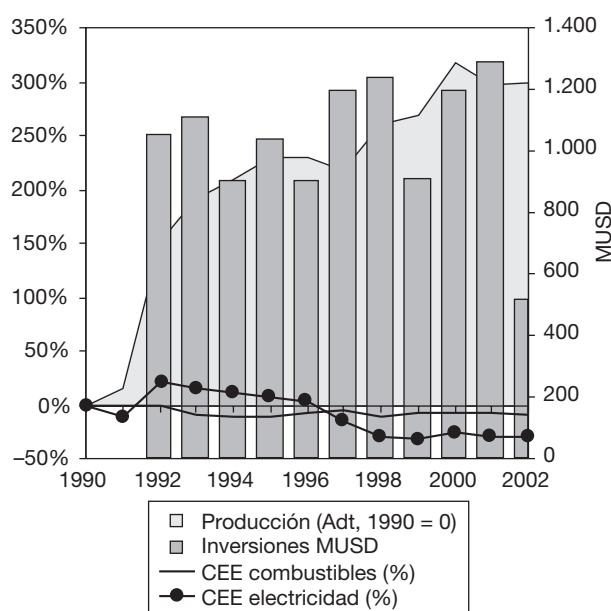


Figura 7. CEE, base 1990 = 0 y variables explicativas.

los que explican los indicadores de CEE en función de variables las explicativas.

Lo anterior permite establecer, como una primera aproximación, que en las mejoras de la eficiencia reviste fundamental importancia las acciones producto de una adecuada gestión energética en los procesos, habida la baja correlación entre los indicadores y estas variables explicativas.

Intensidad Energética

La intensidad energética, que en el sector depende fuertemente del valor internacional de la celulosa y se expresa en función del valor agregado generado de los ingresos totales de producción menos los costos fijos y variables directamente relacionados con ella, se muestra en la Figura 8. Esta figura muestra los indicadores de intensidad para el total de las fuentes energéticas separadamente de la Intensidad para Electricidad y Combustibles, en porcentaje de su variación con respecto al año 1990, se observa claramente cómo tuvieron su máximo el año 1992, producto de la puesta en marcha de nuevas plantas, teniendo un comportamiento errático posteriormente hasta el año 2002.

La obtención de las Intensidades Energéticas no entregaría una información útil si no se asocian con el valor de venta, por tonelada de producción, del cual depende dicho valor agregado. Si a lo anterior se in-

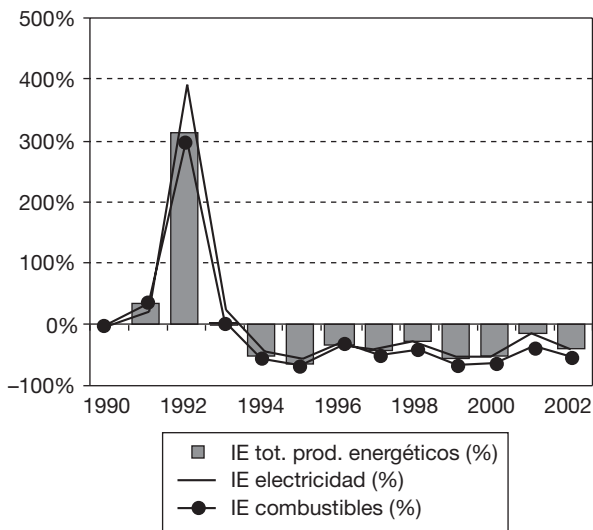


Figura 8. Intensidad energética base 1990 = 0.

corpora la producción física, adquiere mayor valor explicativo el comportamiento de este indicador. En la Figura 9 se ha obviado la presentación separada para combustibles y electricidad, por la casi absoluta coincidencia de las curvas para estas dos fuentes energéticas por la escala de la figura, entregándose en consecuencia la intensidad solo para el total de las fuentes de energía consumidas.

En esta figura se puede observar que la Intensidad Energética tiene un comportamiento en relación inversa al valor de la tonelada de celulosa, siendo obviamente la relación directa entre el valor agregado y el precio por tonelada.

Potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética

Al aplicar al modelo los consumos de los distintos energéticos y sus Consumos Específicos de Energía, resumidos en las Figuras 2, 5 y 6, se obtiene en la Figura 10 que entrega la generación de energía eléctrica, informada por las plantas, y los resultados del modelo. Se obtuvo una diferencia máxima para el año 2000 de un 0,25%, manteniéndose en un 0,23% para los dos últimos años.

La aplicación del modelo, al año 2002, con la eficiencia en el uso de los combustibles alcanzado en 1998 y el consumo histórico de Desechos Húmedos de Madera (como desechos del proceso y su compra informada por las plantas), más el Licor Negro generado y el petróleo adquirido en cada año, produjo como resul-

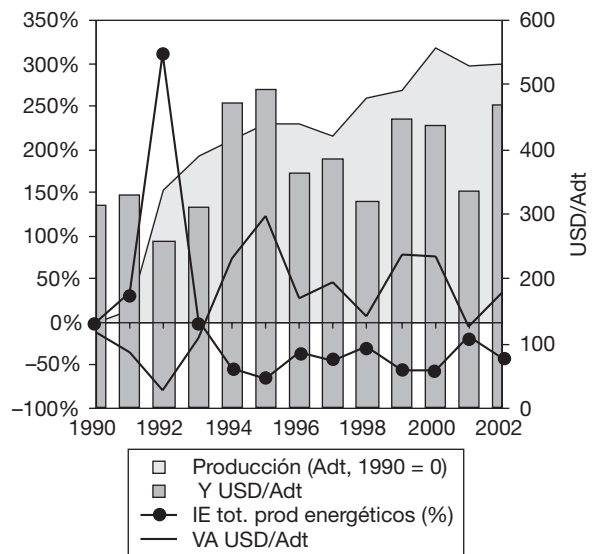


Figura 9. Intensidad energética, Adt, V.A. y precio de la celulosa.

tados los valores que se muestran en la Figura 11. En esta figura se puede observar, al compararla con la Figura 10, que la potencialidad de aumento de la cogeneración eléctrica alcanza el 17,9% (de 1.037 a 1.221,5 GWh). Hay que tener presente que los valores expuestos en la Figura 10 están en base a los datos históricos y en la Figura 11 son los resultados de la aplicación del modelo, a una eficiencia en el consumo mínima.

Bajo estas condiciones se podría haber pasado de los 360 GWh vendidos en 2002 a 579 GWh (según el modelo).

Un segundo escenario, en la aplicación del modelo, utilizando las eficiencias máximas históricas aplicadas en el escenario anterior (15,88 GJ/Adt para el consumo de combustibles y 1,57 GJ/Adt para el consumo

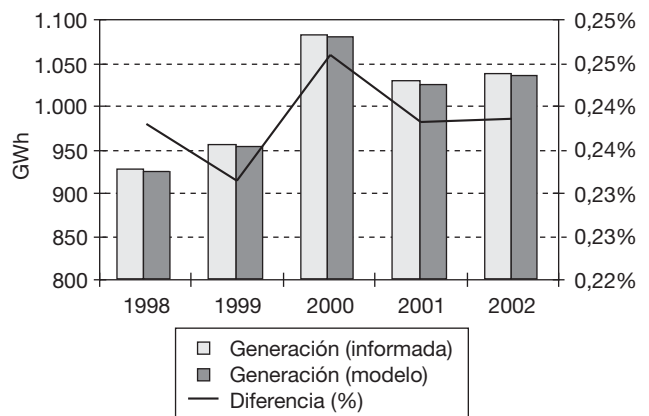


Figura 10. Generación informada.

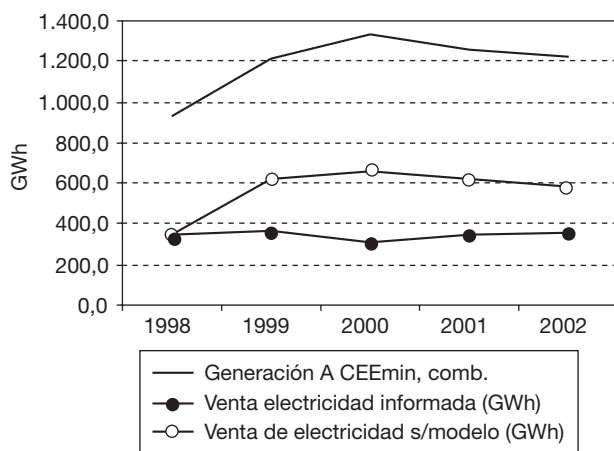


Figura 11. Venta de electricidad.

de electricidad), con las restricciones impuestas referentes a los consumos máximos de Desechos Húmedos de Madera y Licor Negro supera los consumos históricos, obteniendo los siguientes resultados para ellos:

- Petróleo: 102.788 m³ año.
- DHM: 47.364 toneladas año.

Esto significa que la industria de la celulosa puede ocupar como máximo estas cantidades de combustibles, dado las limitaciones técnicas de sus turbogeneradores.

El quemar estos volúmenes adicionales de DHM y petróleo, en sus calderas, el sector podría haber obtenido, para el mismo año del escenario anterior (año 2002, con igual producción de Adt), una generación de electricidad de 1.333,75 GWh. Esto habría significado pasar de una venta de 360 a 667 GWh.

La variable costos no es una limitante. Al ser el Licor Negro la principal fuente energética, el costo de producir energía eléctrica está determinado por su valor y no por el del petróleo requerido para aumentos adicionales de generación. Esto a pesar del elevado precio comparativo del petróleo frente a los DHM y al Licor Negro. Los volúmenes adicionales de petróleo no impactan sustantivamente los costos de producción y por ende en la oferta a precios competitivos de electricidad.

Discusión

Un análisis de los antecedentes que dan cuenta de la variabilidad en la gestión de procesos, y en especial en la forma como se consumen las diferentes fuentes energéticas, encuentran como una probable justificación en las ventajas competitivas que el sector tiene

frente a sus competidores. Esta ventaja esta dada por los significativos menores costos de la madera utilizada en la fabricación de celulosa.

Los datos entregados por RISI (Resource Information Systems, Inc), en World Pulp Annual Historical Data, para el año 2005 entregan costos para la madera sustancialmente inferiores pero, a su vez, los costos de energía son mayores que los registrados en Finlandia, Portugal, Suecia o Brasil.

Consumo de Combustible

Mayoritariamente el combustible en MJ utilizado en las plantas corresponde al Licor Negro, principalmente empleado en la caldera recuperadora. Este combustible junto a los DHM, consumidos en la caldera de poder, corresponden al grueso de la energía utilizada.

El uso de petróleo se trata de evitar al máximo por su alto costo comparativo frente al LN y DHM. Su empleo se circunscribe en el caso de paradas de planta, para reforzar en caso de fluctuaciones en la demanda de calor de los procesos o requerimientos de mayor co-generación.

Tanto el Licor Negro como los Desechos de madera de no ser quemados tienen un fuerte costo de tratamiento para aminorar su impacto ambiental, por lo que su utilización como fuente energética presenta ventajas en los costos ante un tratamiento comparativo para cumplir las exigencias ambientales en el caso de no ser quemados.

Por lo señalado anteriormente, todo el Licor Negro y los desechos de madera son quemados, motivo por el cual son vistos como una fuente energética de valor residual para las empresas.

Cabe destacar que en el caso de compra de los desechos de madera a proveedores externos al Sector Celulosa y Papel presenta beneficios adicionales, aminorando los impactos ambientales de los desechos de los aserraderos circundantes, los cuales de no ser adquiridos por el sector generalmente son quemados sin ningún tratamiento en sus emanaciones o simplemente se amontonan para que se descompongan en forma natural.

Indicadores de Eficiencia Energética

Un hecho relevante es que en el indicador de Intensidad Energética el valor agregado depende fundamentalmente del precio de la celulosa. Consecuente-

mente, por las variaciones que experimenta este indicador cada año, no tienen sentido un análisis de tendencias en la eficiencia energética con este indicador.

En lo que respecta al CEE, es relevante diferenciar la proporción de los combustibles utilizados en el proceso, del total de combustibles consumidos por el sector, ya que este indicador entregará una visión errónea en la medida del volumen de cogeneración eléctrica en cada año. Para su comparación entre países es relevante la venta de electricidad ya que algunas economías benefician con sobre tasas la generación con biomasa.

La eficiencia energética de combustibles, puede ser optimizada principalmente por la gestión energética en las calderas. Estudios a este respecto, se encuentran publicados en la revista *Celulosa y Papel* (ATCP Chile), que en uno de sus artículos técnicos (Raucola *et al.*, 2003) analiza el efecto de contenidos de sólidos secos en el Licor Negro, precalentamiento de aire, precalentamiento de agua de alimentación, el aumento de la eficiencia al aumentar los parámetros de temperatura y presión del vapor, entre otros, que en su conjunto pueden llegar a optimizar sobre un 20% la eficiencia de la caldera recuperadora.

En lo que se refiere al Consumo Específico de Electricidad este manifiesta una tendencia a mejorar el indicador pero, sorprendentemente, guarda una baja correlación respecto a la inversión en maquinaria en que las mejoras por este concepto deberían tener una incidencia directa en la eficiencia al igual que en el Consumo Específico de Energía en combustibles.

Los resultados del presente estudio demuestran que la eficiencia energética no está influenciada por el nivel de inversiones del sector (analizado en base a los saldos de los activos fijos anuales), lo que significa que éstas no están enfocadas a maximizar la eficiencia energética en combustibles, como tampoco el valor agregado, sino solo tienen un efecto en el volumen de producción.

Por todo lo anteriormente expuesto las inversiones, a nivel del sector, tienen una incidencia menor en el Consumo Específico de Energía que en otros sectores industriales que en este aspecto pasa a ser relevante.

El presente estudio demuestra que el sector presenta variaciones, algunas significativas, en los indicadores de eficiencia para la serie de tiempos analizada. Estas variaciones demuestran que ante requerimientos como los presentados en los años 1997-98, por la sequía que impactó a la generación hidroeléctrica y consecuente disminución de oferta en el Sistema Eléctrico Interconectado Central en Chile, el sector es capaz de conseguir importantes disminuciones en sus con-

sumos de electricidad y combustibles en sus procesos de fabricación de celulosa.

En estos años el sector captó cabalmente la importancia de la venta de energía eléctrica, aumentándola significativamente, pero fue incapaz de mantener esos niveles de eficiencia en los años posteriores.

En el caso del CEE en electricidad, que mantuvo fuertes variaciones posteriores a los años 1997-98, demuestran una inadecuada comprensión y gestión de que la energía ahorrada es energía vendida y, por consiguiente, mayores niveles de ingresos no operacionales y aumento general de competitividad.

Cogeneración y venta de electricidad

Si se analizan los CEE mínimos, de combustibles y electricidad, se observa que el sector alcanzó su máxima eficiencia en los años 1997-98, años correspondientes a la crisis en el Sistema Interconectado Central Eléctrico, que por la menor generación exigió un esfuerzo especial al sector para ahorro en el consumo de electricidad y un aporte máximo de cogeneración eléctrica para la venta de excedentes.

La aplicación del modelo con su limitante, referida a la capacidad instalada, demuestra que el sector puede aumentar su cogeneración hasta copar la capacidad de quema adicional de petróleo en sus calderas. La cantidad de GWh a generar bajo las condiciones hubiese sido de 1.333,75 GWh lo que representaría un aumento del 28,74%. En términos de venta de electricidad, esto representa 667 GWh.

Gestión Energética

Referente a la gestión energética, a la que se ha hecho referencia en numerosas ocasiones, manifestada al tenor de los datos expuestos, por la variabilidad experimentada por los Consumos Específicos de Energía tanto en electricidad como en combustibles (combustión en calderas) hay dos grandes líneas de acción: una referida a los procesos y otra referida a la operación de calderas.

Gestión Energética en procesos

Los indicadores de eficiencia en el sector celulosa determinan que la electricidad y combustibles pueden

ser usados de una manera más eficiente a la actual existiendo potenciales ahorros de energía. Una de las causas que se han observado y señalado en la presente trabajo es la referente a la disponibilidad, confiabilidad y acceso a las estadísticas de consumo:

La evaluación de los resultados de las distintas acciones de optimización descansa fundamentalmente en mediciones de flujo de vapor y temperatura. Sin embargo, los resultados de los análisis expuestos y de lo que se pudo observar en terreno, algunos consumos no se encuentran cuantificados en forma eficiente para su rápido análisis y otros están sin un grado de exactitud adecuado para obtener conclusiones válidas. Esto trae como consecuencia incertidumbre respecto de los consumos reales de energía y vapor, haciendo que un balance sea muy lento y difícil de cuadrar.

Esto último se agrava si las auditorías energéticas, que se realizan periódicamente en la plantas, no son entendidas o compartidas a cabalidad por quienes deben efectuar las correcciones a las deficiencias que ellas entregan

Gestión Energética en Calderas

En las plantas se observa que la presión y temperatura, en las calderas y en el agua de alimentación, son menores que en el caso de mayores niveles tecnológicos de las plantas del norte de Europa. La diferencia de presiones y temperaturas tienen su incidencia en el rendimiento de las calderas existiendo, consecuentemente, potencial para una mayor generación de energía, que podría llegar a aumentos de hasta un 20% en la cogeneración.

Estudios sobre el contenido de sólidos secos en el Licor Negro señalan que un 10% de variación de ellos implican aumentos de cogeneración del orden del 3%.

A lo anterior se suma la factibilidad de turbinas de condensación, ya que en las plantas modernas el consumo del vapor de proceso ha disminuido y, por lo tanto, se dispone de vapor de contrapresión en exceso para ser utilizado.

Referencias bibliográficas

- ASIA PACIFIC ENERGY RESEARCH CENTER (APER), 2000. Energy Efficiency Indicators for Industry in APEC Region., Institute of Energy Economics, Japan. APEC # 00-RE-01.7 ISBN 4-931482-05-8
- CNE, 2004. Estimación del Potencial de Ahorro de Energía, mediante mejoramientos de la Eficiencia Energética de los distintos sectores del consumo en Chile. Disponible en Internet: http://www.cne.cl/medio_amb/eficiencia/pdf/Info_Final_Potencial.pdf. (Accesado en: Junio 10, 2005)
- INE, 2004. Correlación CIU Revisión 2 y 3, Instituto Nacional de Estadísticas. Disponible en Internet en: <http://www.ine.cl/19-nacional/glosario.htm>. (Accesado en: Mayo 4, 2005).
- LOAIZA R., SOTO H., MÉNDEZ A., UMANZUR P., 1999, La energía Eléctrica en la Industria de la Celulosa y el Papel. Anales, XIII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, USACH, Santiago, Chile.
- PHYLIPSEN G.J.M., WORRELL E., BLOK K. 1998. Energy efficiency indicators for the industrial sector and example of their use in policy making. In: Park, Hi-chun and Jeong-Shik Shin (eds). Proceedings of 1998 Seoul Conference on Energy Use in Manufacturing: Energy Saving and CO₂ Mitigation Policy Analysis, Seoul, May.