



ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE LA INDUSTRIA PAPELERA EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

Luisa Piedralba Rico, Eduardo Blanco Marigorta, Eduardo Álvarez Álvarez
uo229022@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El sector de la pasta y el papel es el cuarto mayor consumidor de industrial de energía a nivel global. La industria de la pasta y papel es un sector muy intensivo en energía, la eficiencia energética y la reducción del consumo de combustibles fósiles es una cuestión importante para el sector, pero a diferencia de otros sectores industriales, la industria de la pasta y papel también produce energía como subproducto, además de ser un sector importante para la cogeneración.

De los procesos de fabricación de pasta y papel el proceso de pasta al sulfato o pasta kraft es el más utilizado por el sector (representa el 65 % del total de pasta producida). De este proceso de fabricación se genera licor negro como subproducto que es utilizado además de para la recuperación de químicos para la obtención de vapor y electricidad.

La tecnología emergente puede desempeñar un papel importante en el aumento de la eficiencia energética y en la reducción de las emisiones de CO₂, en particular una tecnología que está aún en fase de desarrollo que es el ciclo combinado de gasificación del licor negro. En este trabajo se hace un análisis de la mejora que puede suponer el uso de esta tecnología a nivel español.

ABSTRACT

The pulp and paper industry is the fourth largest industrial consumer of energy to global

level. The pulp and paper industry is a very energy intensive industry, energy efficiency and reducing consumption of fossil fuels is a major issue for the sector, but unlike other industries, the pulp and paper industry also produced energy as a by-product in addition to being an important sector for cogeneration

In the manufacture of pulp and paper the process of sulphate pulp or kraft pulp is the most used by the industry (represents 65 % of the total produced pulp). This process of manufacturing black liquor is generated as a by-product that is used in addition to the recovery of chemicals for generating steam and electricity.

Emerging technology can play an important role in increasing energy efficiency and reducing CO₂ emissions, in particular a technology that is still in development phase that is the black liquor gasification combined cycle. This paper analyzes the improvements that can involve the use of this technology to Spanish level.

1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se hará un análisis de la situación de la industria papelera a nivel europeo y español y también a nivel energético.

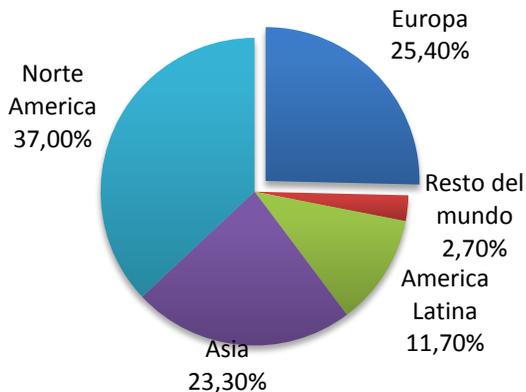
1.1. Industria papelera en Europa

Europa juega un papel importante en la industria mundial de la celulosa y el papel, como se muestra en la Figura 1 [5], es el segundo mayor productor. Su importancia en la producción



pasta es significativa, la producción anual de pasta de papel en Europa es de aproximadamente 38,37 millones toneladas/año, la cantidad producida representa alrededor del 21% de la producción de pasta total mundial de 183,8 millones de toneladas.

Figura 1. Producción de celulosa por regiones en 2011.



TOTAL: 183.8 Millones toneladas
 % cambio sobre el año anterior: 0.5

Fuente: CEPI, RISI 2012.

La mayor parte de la madera que se utiliza para la fabricación de pasta en Europa se suministra mediante el uso de recursos nacionales: en 2011, el 81,1% de la madera (125,9 millones de m³) se suministraron de fuentes nacionales y el 18,9% restante de madera fueron importados a plantas de celulosa de Europa que utilizó un total de 142,9 millones de m³ de madera [6].

En Europa, el mercado de la pasta se produce principalmente por las fábricas en Finlandia, Suecia, Francia, Portugal, España, Austria, Alemania y Polonia.

En 2011, unos 22,4 millones de toneladas / año de celulosa se produjeron en Finlandia y en Suecia (juntas representan el 58,3% de la producción total de pasta de 38,4 millones de toneladas), mientras que Portugal, España, Austria, Alemania, Noruega y Francia producen juntos aproximadamente 12,1 millones de toneladas (31,5% del la producción total). [5] Los cuatro mayores mercados de celulosa de mercado son Italia, Alemania, Francia y el Reino Unido.

El número total de plantas de celulosa en Europa es de 170. Suecia y Finlandia tienen la mayor parte de las fábricas más grandes con más

de 300.000 toneladas de capacidad por año y sólo unas pequeñas fábricas con un tamaño de menos de 25.000 toneladas por año.

Durante los diez años, el número de fábricas de pasta disminuyó desde 296 hasta 170. Al mismo tiempo, la capacidad media de las plantas de celulosa en Europa aumentó de 39,58 millones de ton/año en el año 1991 a 42,55 millones de ton en el año 2012.

1.2. Industria papelera en España

España es el 6º productor de papel de la UE, detrás de Alemania, Finlandia, Suecia, Italia y Francia y por delante ya del Reino Unido. En producción de celulosa ocupamos asimismo el 6º puesto, en un ranking en que nos preceden Suecia, Finlandia, Alemania, Francia y Portugal. En 2011 la producción total española fue de 8,2 millones de toneladas, que se distribuyen en 2 millones de toneladas de celulosa y 6,2 millones de toneladas de papel y cartón. [1].

El sector papelero español cuenta con 85 plantas industriales (11 fábricas de celulosa y 74 fábricas de papel) y genera 17.400 empleos directos y más de 90.000 empleos indirectos. El sector exporta el 50% de la producción de papel y de celulosa. Las tres cuartas partes de las exportaciones del sector tienen por destino otros países de la Unión Europea, fundamentalmente, Francia, Portugal, Italia, Holanda, Reino Unido, Alemania y Polonia. [1].

1.3. Industria papelera a nivel energético

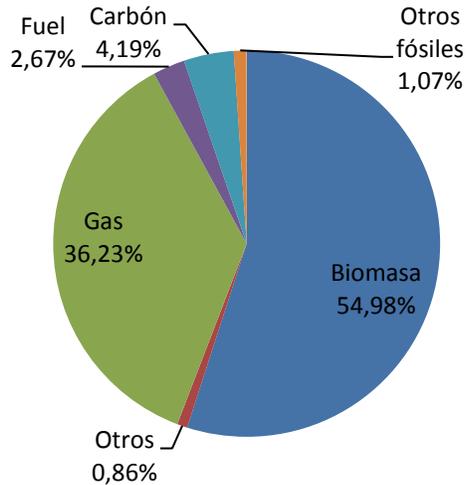
La industria de la celulosa y el papel es un sector muy intensivo en energía. Hay una amplia gama de procesos de fabricación pasta y productos papel, cada uno con diferentes requisitos de energía. La energía necesaria para la producción de papel es comparable a la de otros productos de alto consumo energético, tales como cemento o acero.

La industria de la pasta y el papel es el mayor consumidor y productor de fuentes de energía renovables y depende mucho de los biocombustibles: en torno al 55% de toda la energía primaria es basada en biomasa. La Figura 2 muestra el consumo de energía primaria de las



compañías europeas del sector de la pasta y el papel en 2011.

Figura 2. Consumo de energía primaria en Europa en la industria de la pasta y papel.



Fuente: CEPI 2012

La eficiencia energética y la reducción del consumo de combustibles fósiles es una cuestión importante para el sector y tiene implicaciones competitivas y medioambientales. En muchos países europeos, se están realizando programas de eficiencia energética para el sector. Sin embargo, la demanda total de energía del proceso sigue siendo alta.

Otro aspecto clave en el desempeño ambiental del sector es la generación in situ de electricidad y calor. La industria de la celulosa y el papel es uno de los mayores usuarios de producción de ciclo combinado de calor y de energía, de cogeneración, (CHP), que permite a las fábricas de papel ahorrar alrededor de un 20% de energía en comparación con las tecnologías convencionales y contribuir a una reducción de gases de efecto invernadero. En 2011, las fábricas europeas de pasta y papel, el 95,2% del total de electricidad generado se produce a través de la cogeneración. [5].

La industria española papelera suma más de 1.100 MW de potencia eléctrica instalada en cogeneración [1]. Este dato hace que el sector papelero suponga el 18% de toda la cogeneración española. Las fábricas de celulosa y papel son grandes consumidoras de energía eléctrica para

mover la maquinaria y generar vapor para secar la pasta y el papel.

La cogeneración, la energía eficiente, está reconocida como MTD (Mejor Tecnología Disponible) a nivel europeo para su empleo en el sector papelero, ya que el recurso de la cogeneración encaja perfectamente con las necesidades de calor útil en los procesos y con su capacidad para ahorrar energía y emisiones, especialmente de CO₂. Cogenerar con muy alta eficiencia es una de las apuestas sostenibles del sector papel, y además es una de las industrias líderes en implantación de la cogeneración.

El Boletín Estadístico anual del 2010 de cogeneración del IDAE muestra una producción de electricidad en cogeneraciones aplicadas en procesos papeleros de unos 5.666 GWh/año (no incluye generación eléctrica asociada a biomasa). El consumo anual en el 2011 de electricidad del sector papelero se situaba en los 4,7 Millones de MWh con un ratio electricidad generada frente electricidad consumida de 1,49 en el 2011. [1].

La industria europea de la pasta y el papel tiene una emisión directa de cerca de 37 millones de toneladas de CO₂ anuales, lo que representa menos del 1% de las emisiones totales de la UE. [DITC, 2008, IEA2010]. Las emisiones de CO₂ son causadas principalmente por los procesos de combustión: la producción de la electricidad y el calor necesario para los procesos.

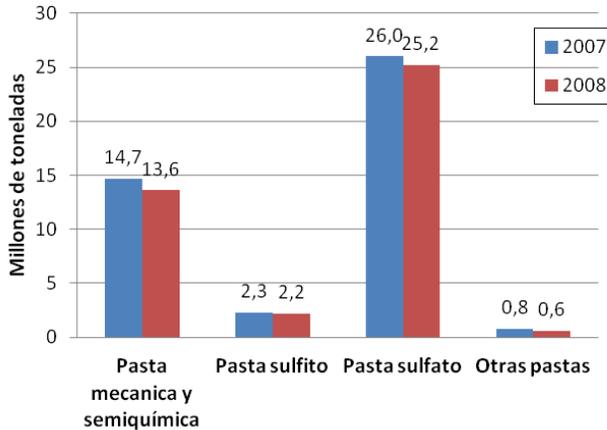
1.4. Tipos de pasta de papel

Las principales calidades de la pasta de papel están basadas en su proceso de fabricación. Hay cinco tipos principales de los procesos de fabricación de pasta: químicos; mecánicos; semiquímicos; reciclado; y otros (por ejemplo, disolución, no de madera).

Las principales calidades de la pasta de madera para la fabricación de papel en 2011 en toda Europa son pasta al sulfato, también denominada pasta kraft (pasta química), (65% de la producción total de pasta), seguido de mecánica y pasta semiquímica (29% del total producción de celulosa) y la pasta al sulfito (también pasta química) (5% de la producción total de pasta). La figura 3 muestra los datos de producción de pasta para las principales calidades de pasta en toda Europa en 2011 y 2012.



Figura 3. Producción total por proceso de fabricación.



Fuente: CEPI 2012

En este artículo nos centraremos en el proceso de fabricación de pasta al sulfato o Kraft por ser el mayoritario (un 65% de la pasta producida), no sólo en Europa sino a nivel mundial.

Se hará una descripción del proceso y se valorarán las mejores técnicas disponibles para aumentar la eficiencia energética del proceso, haciendo una estimación de los beneficios energéticos derivados de su implantación en la industria papelera española.

2. PROCESO FABRICACIÓN DE PASTA AL SULFATO

En este apartado se hará una descripción del proceso de fabricación de pasta de papel al sulfato y del consumo energético del mismo.

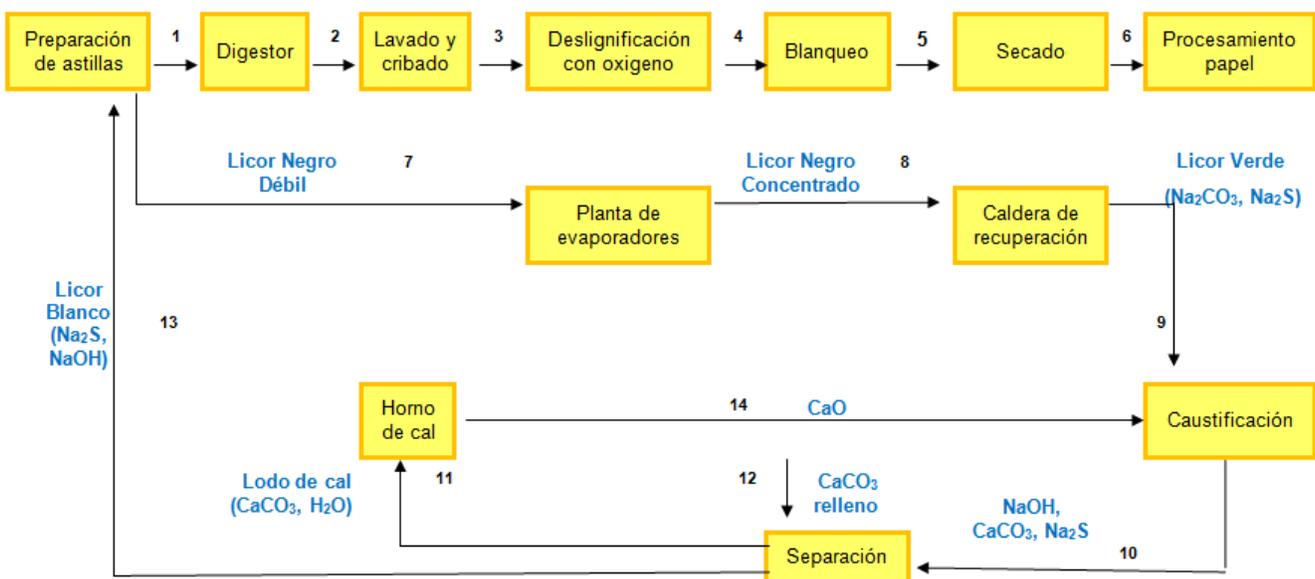
2.1. Descripción del proceso de fabricación de la pasta al sulfato o pasta kraft.

La fabricación de pasta papel se puede dividir en seis etapas:

- preparación de la madera;
- fabricación de pasta;
- blanqueo;
- recuperación de los productos químicos;
- secado de la celulosa; fabricación de papel.

La figura 4 muestra el diagrama de flujo del proceso al sulfato de fabricación de la pasta de celulosa.

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso al sulfato





a) *Preparación de madera.*

La madera es la principal materia prima utilizada para la fabricación de celulosa. La madera entra en las fábricas de celulosa y papel normalmente en forma de troncos o astillas y se procesa en el área de preparación de la madera, denominado como el parque de maderas. Las operaciones del parque de maderas son independientes del tipo de proceso de fabricación de pasta.

Los troncos de madera son descortezados, lavados y seguidamente astillados en las astilladoras. Las astillas son clasificadas en tamices vibrantes, para rechazar las astillas con sobretamaño para ser devueltas a la astilladora y eliminar los finos y astillas subdimensionadas, las cuales son conducidas a un silo de finos (serrines) para ser empleadas como combustibles en calderas. Espesores menores de 2-3 mm generan una sobrecocción de la madera debilitando la resistencia de la fibra y espesores mayores de 7-8 mm genera una cocción incompleta produciéndose nudos.

Una vez clasificadas, las astillas son almacenadas en los silos de astillas cuya función es homogeneizar las mezclas de astillas de diferentes fuentes. La homogenización de las astillas es importante ya que de ella dependen las propiedades finales de la celulosa.

b) *Fabricación de la pasta*

La obtención de pasta de celulosa consiste en separar las fibras de ésta de la lignina. La pared celular de los vegetales está formada por polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) en un 70 a 85% y por lignina de un 10 a un 30%. Esto constituye el llamado material lignocelulósico. El resto son sustancias solubles en disolventes orgánicos (taninos. Terpenos, lípidos, etc.).

Tal y como hemos comentado, la fabricación de pasta química es el más proceso de fabricación de pasta común.

Los métodos químicos usados en la deslignificación de la celulosa se dividen en ácidos y alcalinos, según el pH del reactivo. Los métodos ácidos son más enérgicos y la separación de la celulosa es mejor, tienen el inconveniente de que

no pueden emplearse con maderas resinosas. Los métodos alcalinos dan bajos rendimientos de pasta, para mejorarlo se suelen emplear aditivos.

Los dos métodos básicos que existen son el método a la sosa o al sulfito y el método al sulfato o Kraft. El método a la sosa está especialmente indicado para maderas frondosas, el método Kraft o al sulfato es una modificación del método a la sosa aplicable a todos los tipos de madera. El agente de cocción es una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio; produce una pasta de gran resistencia que da nombre al proceso (Kraft significa resistencia en alemán). Hoy en día, más del 65% de la pasta de celulosa se obtiene por el método Kraft o al sulfato.

El proceso de fabricación de pasta kraft utiliza un licor de cocción alcalino de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) llamado licor blanco para digerir la madera. Este licor blanco es mezclado con las astillas de madera, que previamente han sido impregnadas de vapor, en un vaso impregnador de alta presión y entran en un digestor. Después de que las astillas de madera se han "cocinado", el contenido del digestor se descarga bajo presión en un tanque de soplado (blow tank) cuya función es reducir bruscamente la presión con el objeto de soltar las fibras aún compactas. La pasta y licor gastado de la cocción (licor negro) se separan posteriormente en una serie de lavadores de pasta cruda.

c) *Blanqueamiento*

El proceso de blanqueo elimina el color de la pasta (debido a la lignina residual) mediante la adición de productos químicos a la pasta en diferentes combinaciones, dependiendo del uso final del producto. Los productos químicos de blanqueo más comunes son cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno, oxígeno, cáustica, y el hipoclorito de sodio. La preocupación por los compuestos clorados, como las dioxinas, furanos y cloroformo se han traducido en el abandono de la utilización de compuestos clorados en el proceso de blanqueo. Los productos químicos se añaden a la pasta en las torres de blanqueo.

Los productos químicos blanqueadores gastados son eliminados en cada fase de los lavadores. El filtrado de los lavadores es recogido en los tanques de sello y reutilizado en otras fases



como agua de lavado o enviado al tratamiento aguas residuales

d) *Recuperación Química*

Por razones económicas y ambientales las plantas de celulosa tienen procesos de recuperación de los químicos gastados en el proceso de cocción de fabricación de pasta.

En fábricas de pasta kraft, el licor de cocción gastado, denominado "licor negro débil," de los lavadores pasta cruda se lleva a la zona de recuperación de productos químicos. El licor negro débil a la salida del digestor está compuesto principalmente de material orgánico disuelto (lignina) y sales residuales del licor blanco, generalmente con una concentración de 8-15% de sólidos. Este licor sigue un proceso de concentración mediante evaporadores de múltiples efectos para aumentar el contenido de sólidos a un 60-80%. Una vez concentrado el resultado es el licor negro fuerte.

El licor negro concentrado se pulveriza a continuación en la caldera de recuperación, donde se queman compuestos orgánicos, y el Na_2SO_4 se reduce a Na_2S . El licor negro quemado en la caldera de recuperación tiene un alto contenido de energía (5.800 a 6.600 Btu/libra de sólidos secos), que se recupera en forma de vapor para el proceso

El producto fundido se disuelve en un líquido llamado licor blanco débil, el resultado es una disolución con gran contenido en sólidos en suspensión, denominado licor verde.

El licor verde decantado se transfiere a la zona de caustificación, donde mediante una serie de adiciones y reacciones se obtiene nuevamente el licor blanco que será nuevamente introducido al digestor en el área de fabricación de la pasta.

e) *Secado de pasta / Fabricación de papel*

En las fábricas no integradas, fábricas en las que el producto terminado es pasta de papel, la pasta producida se seca, empaca y luego se envían a las fábricas de papel. En fábricas integradas, fábricas en las que el producto terminado es papel, incluye la mezcla de pasta específica para el producto de papel deseado, la dispersión en agua, golpes y refinación para agregar densidad y resistencia, y la adición de

cualquier aditivo necesario (para crear productos de papel con propiedades especiales o para facilitar el proceso fabricación de papel). Los aditivos húmedos comprenden resinas y ceras para la repeler al agua; arcillas, sílices, talco, colorantes orgánicos / inorgánicos para colorear; y ciertos productos químicos inorgánicos (calcio sulfato, sulfuro de zinc, y dióxido de titanio) para mejorar la textura, la calidad de impresión, opacidad, y brillo.

El proceso de transformación de la pasta en papel es similar para todos los tipos de pasta. La pasta se toma de un tanque de almacenamiento, se tamiza y refina (si es preciso) añadiendo los aditivos necesarios, y se coloca en una caja de entrada a máquina.

La pasta en suspensión se lleva a través de una máquina de papel y luego se pasa a través de una sección de prensa, donde las aguas blancas son drenadas y se inicia el proceso de formación de la hoja. La hoja de papel se lleva entonces a través de una secadora y una serie de cabinas para recubrimiento y secado. El producto terminado se presiona para reducir el espesor y alisar la superficie y se enrolla sobre carretes de almacenamiento.

2.2. Consumo de energía.

El sector de la pasta y el papel es el cuarto mayor sector industrial en términos de uso de energía, con un consumo de 164 Mtep de energía en 2007, el 5% del consumo de energía industrial global total. [12].

La entrada principal para la fabricación de pasta y papel es la madera. A diferencia de otros sectores, la industria de la pasta y el papel también produce energía como subproducto a partir de residuos de biomasa. La mayor parte del combustible utilizado en la fabricación de pasta y papel se utiliza para producir calor. Poco más de una cuarta parte se utiliza para generar electricidad. Su amplio uso de la biomasa hace que el sector sea uno de los menos intensivos de emisiones de CO_2 , el sector emitió 183 millones de toneladas de CO_2 a nivel mundial en 2007, lo que representa el 2% de las emisiones directas de la industria. [12]. En 2011 la industria europea de la pasta y el papel emitió 45,72 millones de toneladas de CO_2 [5].



Existen diferencias significativas en la necesidad de energía para la fabricación de pasta y papel entre países, debido a una serie de factores: tales como la mezcla de productos, procesos utilizados, el tamaño de la planta, la tecnología, la era de la técnica, la calidad de la materia prima, los precios del combustible, la disponibilidad de biomasa y la eficiencia energética.

La mayor parte de la energía térmica se consume para calentar diferentes fluidos y para evaporar el agua. La energía térmica también se utiliza para acelerar o controlar las reacciones químicas. La energía eléctrica se consume principalmente para el transporte de materiales (de bombeo) y para el funcionamiento de la máquina de papel (sólo en las fábricas de pasta integradas).

Las fábricas de pasta química son por un lado industrias de alto consumo energético, consumen grandes cantidades de energía, pero al mismo tiempo producen vapor y energía eléctrica mediante el uso de combustibles renovables (biomasa).

Las plantas de celulosa kraft modernas no integradas son autosuficientes de energía debido principalmente a la recuperación eficiente de la energía por la quema de 50% de la madera entrante en la caldera de recuperación (licor negro) y el uso de la corteza como combustible. Además, la energía secundaria de diferentes pasos del proceso se puede recuperar como agua templada y caliente (40-80 °C).

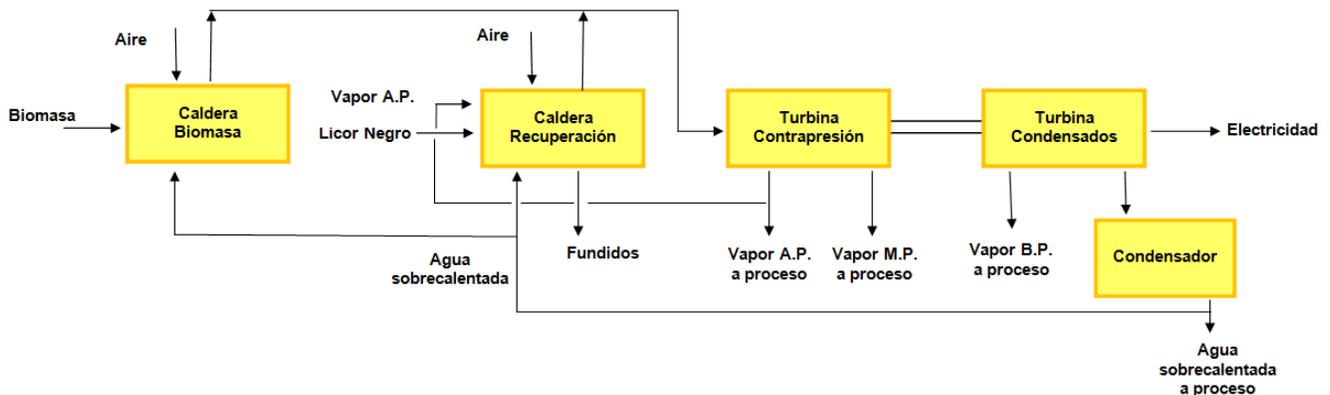
Algunas fábricas reducen la necesidad de combustibles fósiles para el horno de cal por el uso de combustibles basados en biomasa, tales como serrines, gas de gasificadores de corteza, el metanol o el aceite de resina de recombustión de cal.

La configuración de la planta de energía convencional en un fábrica de pasta kraft no integrada es una caldera de recuperación tipo Tomlinson y una caldera de biomasa de alimentación a una turbina de contrapresión y posiblemente, de condensación. La caldera de recuperación actúa como una estación de energía en el que el licor negro se quema y el calor generado se utiliza para la generación de vapor alta presión, y de agua sobrecalentada. Parte del contenido de energía en el vapor a alta presión se utiliza para generar energía en una turbina de contrapresión. El vapor de media y baja presión extraído de la turbina se utilizan para cubrir la demanda de energía de calor en el proceso de la pasta kraft.

Los gases malolientes se recogen y se queman, aunque tiene poca capacidad calorífica se queman principalmente por razones medio ambientales y para evitar el olor desagradable la zona.

En la Figura 5 se muestra diagrama de flujo de un sistema de recuperación convencional de una fábrica de pasta kraft. Este diagrama nos servirá de base para una comparativa que se realizará en adelante.

Figura 5. Diagrama de flujo de un sistema de recuperación convencional de una fábrica de pasta kraft.

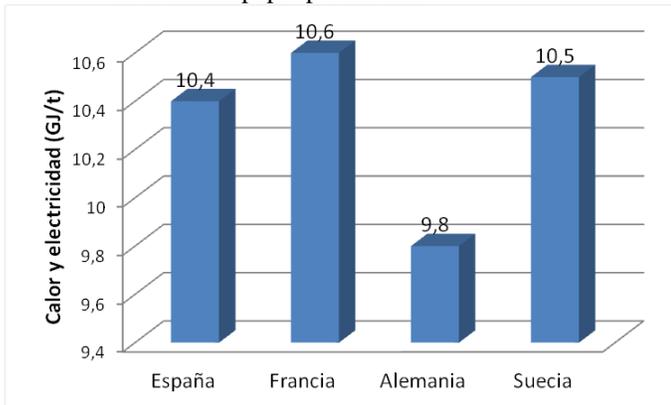




Con respecto a su competencia europea, la industria española del papel tiene en el ámbito energético una clara ventaja competitiva por su buen nivel de eficiencia energética, su apuesta por la cogeneración y su alta utilización de combustibles limpios y renovables.

El sector papelero español es, de media, de tamaño inferior a su competencia europea, hecho que se plasma en el consumo energético comparado con otros países de referencia en la UE. La Figura 6 representa el consumo específico de calor y electricidad por tonelada en el sector del papel en España y algunos países de referencia.

Figura 6. Consumo específico de calor y electricidad por tonelada de papel producido.



Fuente: Observatorio Industrial del Sector del Papel

La industrial de pasta y papel consume 5,9 EJ de energía al año. En 2003, según las estadísticas de la AIE, la industria de pasta y papel utilizó 1,9 EJ de la bioenergía, sobre todo en la forma de licor negro. El uso real puede ser algo mayor, ya que una cantidad significativa de la bioenergía es registrado en las estadísticas de la AIE en "uso de la industria no especificada", parte de la cual puede ser en realidad la pasta y la producción de papel.

Una fuerte dependencia de la industria con la bioenergía significa que la intensidad energía no es muy alto, y el potencial de reducción CO₂ en la industria de la pasta y papel son limitados.

La Tabla A.1 del anexo muestra distintos indicadores energéticos y medioambientales de la industria papelera española, entre los que cabe destacar los 1.135 MW de potencia instalada en cogeneración con unas emisiones totales de CO₂

de 4.3 millones de toneladas, y una generación de electricidad de 7MWh. Además se desglosa la generación y gestión de residuos, así como la utilización de agua y su tratamiento.

3. TECNOLOGÍA DISPONIBLE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.

La tecnología podría desempeñar un papel importante en el aumento de la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂ en la industria de la pulpa y el papel. Las actuales instalaciones de pasta y papel en muchos países de la OCDE están a punto del final de su vida operativa y necesitaría ser reemplazado en los próximos 10-15 años.

Una fábrica de celulosa que produce celulosa blanqueada kraft genera 1,7 a 1,8 toneladas de licor negro (medido como contenido de sólidos secos) por tonelada de pasta, lo que representa un potencial energético de 250 a 500 MW para una fábrica con una producción de 1000 a 2000 ADt (tonelada de pasta seca) día. [19], por lo tanto licor negro representa un gran potencial energético.

Hoy en día, el licor negro es la fuente más importante de energía partir de biomasa en países como Suecia y Finlandia con una gran industria de la pulpa y el papel.

En comparación con otros tipos de fuentes de biomasa, el licor negro tiene la gran ventaja de que está ya parcialmente procesado y existe en una forma bombeable, líquido.

Las tecnologías emergentes de ahorro de energía más prometedoras en la industria están basadas en la gasificación del licor negro, principalmente un ciclo combinado de gasificación del licor negro.

En las fábricas de pasta kraft estándar que utilizan el procedimiento del sulfato, el licor gastado producido a partir de la deslignificación de las astillas de madera, denominado, licor negro, normalmente se quema en una gran caldera de recuperación (caldera tipo Tomlinson). Debido al alto contenido de agua del licor negro (por lo general es quemado en una proporción de sólidos contenido de 60% a 80%), la eficiencia de las calderas de recuperación existentes es limitada. La producción de electricidad es también limitada,



ya que las calderas de recuperación producen vapor a baja presión por razones de seguridad.

La eficiencia térmica y eléctrica superior de la Gasificación del Licor Negro (BLG) con respecto a las calderas Tomlinson, el Ciclo Combinado de Gasificación del Licor Negro (BLGCC) reemplazará finalmente al ciclo de recuperación convencional. Con el ciclo combinado de gasificación de licor negro, BLGCC, se puede producir aproximadamente, el doble de electricidad por tonelada de licor negro en comparación a una caldera de recuperación convencional. El sistema BLGCC convierte una fracción de entrada de combustible en energía eléctrica [10].

En las próximas perspectivas a 15 años, alrededor de 442 calderas Tomlinson en todo el mundo probablemente se convertirá técnica y económicamente en obsoletas debido a la presión competitiva de la planta de celulosa, suplementaria con la electricidad y/o la producción de combustible [9].

Esto presenta una excelente oportunidad para que el desarrollo de la tecnología tenga un impacto en el ahorro de energía en el sector en el mediano plazo.

3.1. Gasificación del licor negro (BLG).

La gasificación ofrece oportunidades para aumentar la eficiencia de la utilización de licor negro. En la gasificación, los hidrocarburos del licor negro reaccionan a gas de síntesis, una mezcla principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. El gas de síntesis se puede utilizar en la generación de energía de turbina de gas o como materia prima química. Esta tecnología, llamada ciclo combinado de gasificación de licor negro (BLGCC), permite el uso eficiente no sólo de licor negro, sino también de otros combustibles de biomasa, como la corteza y virutas de madera. Alternativamente, el gas de síntesis se puede utilizar como materia prima para producir productos químicos, en efecto, convirtiendo la fábrica de papel en una "bio-refinería." En Europa, políticas encaminadas a aumentar la cuota de biocarburantes en el transporte han despertado el interés del uso de gasificadores de licor negro para producir dimetiléter (DME) como un reemplazo para el combustible diesel.

La gasificación del licor negro es una tecnología alternativa de recuperación que ha tenido un desarrollo por etapas ya que su precursor temprano se desarrolló en la década de 1960. La tecnología BLG actualmente más avanzada en el mercado es la tecnología Chemrec., que se basa en un flujo arrastrado de gasificación del licor negro a temperaturas por encima del punto de fusión de los productos químicos inorgánicos. En un sistema de BLG la caldera de recuperación se sustituye por una planta de gasificación.

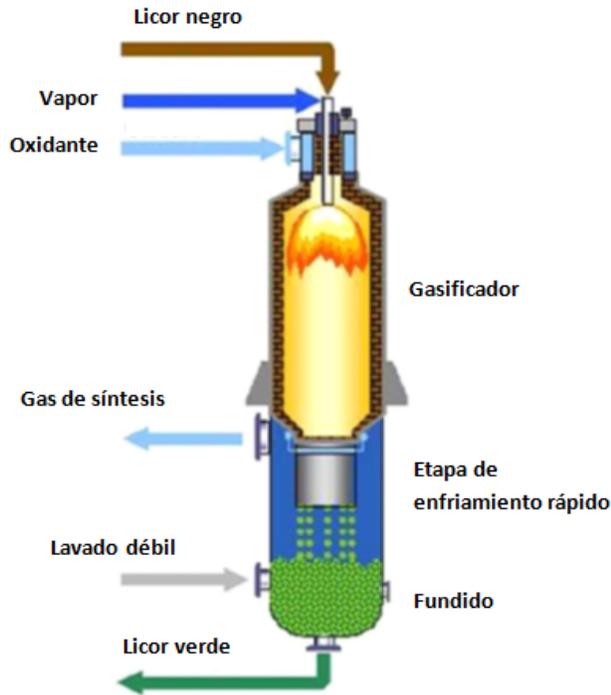
El sistema de Chemrec, Figura 7 gasifica el licor negro evaporado en un reactor, revestido de flujo refractario, arrastrado a presión en condiciones reductoras, a 30bar y 950-1000°C, utilizando oxígeno como agente gasificante. La cama del gasificador se compone de carbonato de sodio y partículas de sulfuro de sodio formadas durante la gasificación. El resultado de la alta temperatura de gasificación es un caldo fundido de los componentes inorgánicos en el licor negro.

Los compuestos orgánicos son gasificados en el llamado gas de síntesis que contiene monóxido de carbono, hidrógeno y metano.

El gas de síntesis y el caldo de fusión fundido fluyen hacia abajo después de un tiempo de residencia de 5-10s a una zona de enfriamiento rápido donde se separan simultáneamente. El material fundido se disuelve para formar licor verde, similar al licor obtenido de la caldera convencional, que se bombea de nuevo al recipiente de solución de lavado débil.

El licor verde se enfría desde la temperatura de enfriamiento de 220°C a aproximadamente 90°C (Berglin et al., 2002). El proceso separa carbonato de sodio a partir de sulfuro de sodio, produciendo dos corrientes de licor blanco de diferente sulfidez.

Figura 7. Sistema de Gasificación de Licor Negro Chemrec.

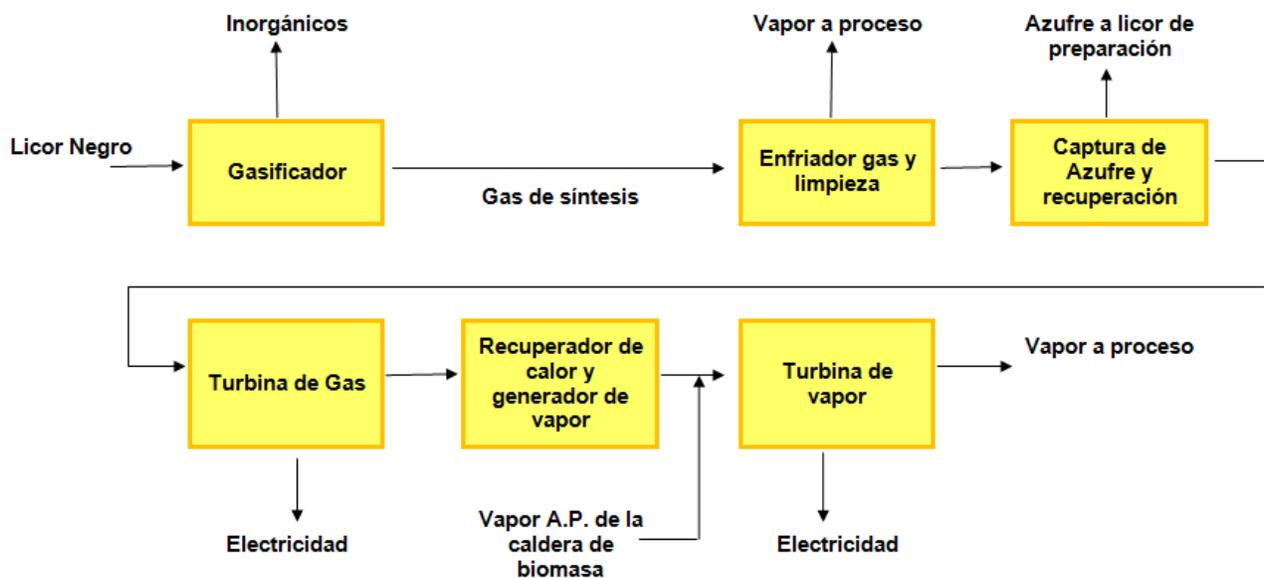


El gas combustible crudo sale del enfriamiento y se enfría más en un contracorriente del condensador. El vapor de agua en el gas combustible se condensa, y esta liberación de calor se utiliza para generar vapor.

El sulfuro de hidrógeno se elimina del gas de combustible fresco y seco en una etapa de absorción a presión. El gas resultante es casi un gas de síntesis sin azufre (gas de síntesis) que consiste en su mayor parte monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono.

La mayor parte del desarrollo de sistemas BLG a gran escala tiene fundamentalmente, el uso del gas de síntesis para proyectarse a una turbina de gas en el que se genera potencia. El gas de combustión caliente de la turbina de gas, se utiliza para generar vapor en una caldera de recuperación, y el vapor generado de alta presión se utiliza en una turbina de vapor para la generación de energía adicional. El concepto es conocido como Ciclo Combinado de Gasificación de Licor Negro (BLGCC) y está representado en la Figura 8.

Figura 8. Diagrama de flujo de un sistema BLGCC.





3.2. Ciclo combinado de gasificación del licor negro (BLGCC)

Näsholm and Westermark (1997) estimaron que el sistema BLGCC tiene una eficiencia neta de electricidad del 22%, lo que significó una salida de electricidad que es dos veces mayor en comparación con una caldera de recuperación Tomlinson. Además de la utilización eficiente de la energía de la turbina de gas, el aumento de electricidad es debido a la posibilidad de recuperar una gran cantidad de calor latente en el gas de síntesis.

En la actualidad tecnología de BLG a alta presión y temperatura, desarrollado por Chemrec, es la más prometedora y más cercana a la implementación de tecnología a escala industrial.

En comparación con un sistema de caldera de recuperación avanzada, el ciclo Chemrec combinado, consistente en una gas y turbina de vapor, es capaz de producir 400 kWh de energía más por tonelada de pulpa, 80 kWh / ADt de las cuales es la energía eléctrica adicional para la venta. Sin embargo el rendimiento de la planta debe ser superior a 450.000 ADt/año con el fin de lograr tal eficiencia de potencia a partir del licor negro gasificado. [O.Grigoray 2009], [15].

A pesar de que la gasificación del licor negro parece ser una tecnología prometedora para la industria de pulpa y papel, existen obstáculos que dificultan su comercialización, el más significativo de ellos son: la disponibilidad de fondos para su realización, la ausencia de un precio asequible y un sistema refractario fiable que proteja el gasificador de condiciones severas durante más de unos pocos años, el logro de una pureza suficiente del gas de síntesis necesarias para el trabajo de la turbina de gas y también un aumento de la carga en el departamento de caustificación. Estas cuestiones exigen mayor estudio y una ejecución de nuevos ensayos.

Durante los próximos diez años, se pueden desarrollar las condiciones favorables para la ejecución de la gasificación negro licor, ya que actualmente la cantidad de plantas de celulosa con una capacidad de más de 450.000 ADt / año es del 12% y seguirá creciendo. Por otra parte, una necesidad urgente de sustituir calderas de

recuperación es inminente, ya que se encuentran al final de su ciclo de vida útil.

A continuación estudiaremos la eficiencia del sistema BLGCC respecto al sistema convencional.

4. AHORRO DE ENERGÍA EN ESPAÑA IMPLEMENTANDO EL SISTEMA BLGCC.

En este apartado se comparan energéticamente el proceso convencional de recuperación de energía con el sistema BLGCC.

4.1. Bases y datos de referencia

Para evaluar la competitividad comercial de la gasificación del licor negro en relación con los sistemas de calderas de recuperación de Tomlinson en España, se utiliza un estudio realizado por E.Larson 2003 [16], 2006 [17]. Las comparaciones de los dos sistemas de recuperación se realizan en el contexto de una fábrica de referencia existente, cuando el sistema de recuperación va a ser reemplazado por un nuevo sistema. La fábrica de referencia tiene las características del proceso de las fábricas típicas para 2010. Se trata de una planta de celulosa y papel integrado. La base de referencia de la fábrica de estudio es de 6.000.000 libras / día de sólidos de licor negro (BLS).

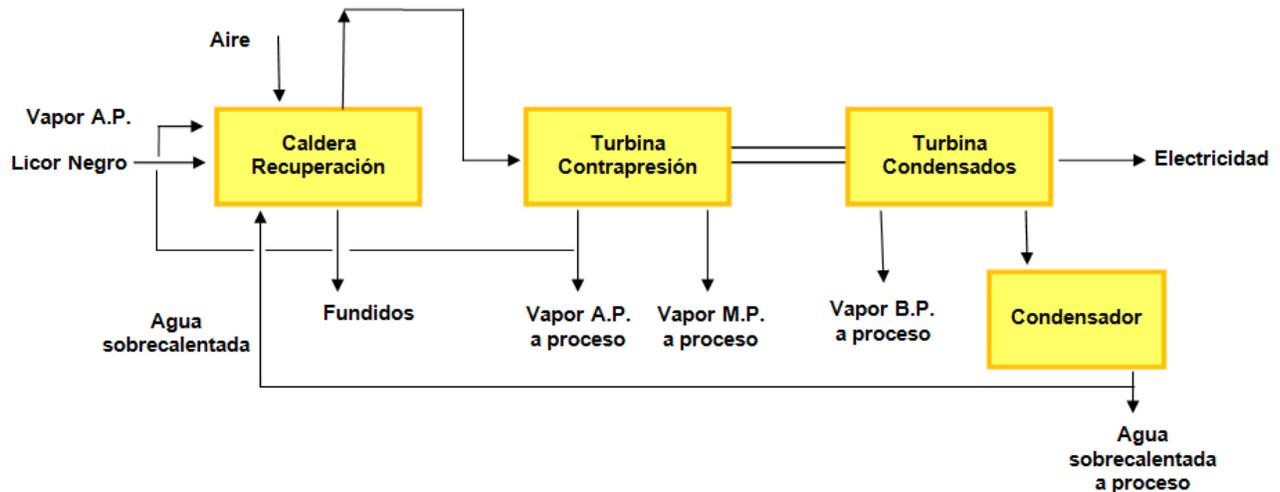
Se calcularon los balances de masa y energía detalladas para cada sistema de recuperación en la fábrica de referencia. E. Larson utilizó una herramienta de diseño y simulación de proceso previamente aplicado ampliamente para el análisis de la combustión y los sistemas de energía basados en la gasificación. El diseño de cada sistema de energía / recuperación fue desarrollado en consulta con los desarrolladores de equipos, ingenieros de diseño industrial, y una variedad de otros expertos.

La configuración del proceso Tomlinson, (Figura 9), cuenta con condiciones de vapor a una presión de entrada a la turbina de vapor de 79 bar y una temperatura de 480°C, el ciclo combinado de gasificación de licor negro (representado anteriormente en la Figura 8) con una presión de 30 bar y una temperatura de 950 °C de entrada a la turbina. En la Tabla A.2. del Anexo se presentan

los parámetros y características de la fábrica de referencia utilizada en el estudio y en la Tabla A.3

del Anexo se exponen los resultados obtenidos.

Figura 9. Diagrama de flujo de un sistema de recuperación convencional (tipo Tomlinsons) sin caldera de biomasa.



De las tablas A.1 y A.2 del anexo se concluye que la producción de 1.580 Tn pasta seca (2.721.555 kg BLS/día) mediante el proceso Tomlinson convencional producen 64,3 MW de potencia neta, por tanto, 1 Tn de pasta seca producen 0,0407 MW, siguiendo el sistema de ciclo combinado de gasificación del licor negro, 1.580 Tn pasta seca (2.458.311 kg BLS/día) producen 114,7 MW de potencia neta, siguiendo la relación de 1 Tn de pasta seca produce 0,0726 MW.

4.2. Cálculos y resultados

En 2011 la producción española de pasta de celulosa fue de 2 millones de toneladas, considerando que el 65 % del total es producido por el proceso al sulfato, se produjeron 1,3 millones de toneladas de pasta al sulfato.

Se pretende evaluar el potencial ahorro de energía anual del uso de un ciclo combinado de gasificación del licor negro (BLGCC) frente los ciclos combinados de calderas Tomlinson convencionales a nivel español, para ello y en base al estudio realizado por E.Larson se analizará la producción neta de energía y la potencia que

podrá ser enviada a la red mediante los dos sistemas, el convencional y el de gasificación.

La producción neta de potencia para toda la fabricación española de pasta al sulfato en 2011 sería de 52.905,06 MW mediante el sistema convencional Tomlinson y de 94.373,4 MW mediante el sistema de ciclo combinado de gasificación del licor negro, lo que supone un aumento de un 43,9% más de potencia neta producida, o lo que es lo mismo 41.468,34 MW más producidos, que comparado con los datos de Red Eléctrica España del informe anual 2013, es algo más de la potencia instalada en España de renovables (38.112 MW).

Para hacer una estimación de las toneladas de CO₂ evitadas utilizando el sistema de gasificación, se calcula la Energía producida (MWh) en función de la potencia producida (MW) y de las horas (h) de funcionamiento del ciclo combinado de la siguiente forma:

$$E_p = P \cdot h \quad (3)$$

Se suponen unas horas de funcionamiento de 8.280 horas (345 días al año las 24 horas del día).

$$E_p = 41.468,34 \cdot 8.280 = 343.357,85 \text{ MWh}$$



En cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂, en España se ha estimado que cada KWh generado por renovables o energías residuales es equivalente a 0.462 kg de CO₂ (Plan de Acción 2008-2012), correspondiendo los 343.357,85 MWh de Energía neta producida con 158.631,33 Tn CO₂ evitadas, lo que supone correspondería con un 1,2 % de las toneladas de CO₂ anuales evitadas en cogeneración en España.

Es de destacar que estos datos obtenidos son una simple estimación, ya que la eficiencia individual de cada fábrica es diferente.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados del balance energético, tabla 3.1 y tabla Anexo se concluye lo siguientes:

- Las demandas de vapor de proceso en la fábrica se satisfacen en los dos casos.
- El total de los consumos de combustible a la zona de recuperación son mayores para el sistema BLGCC que para los sistemas de Tomlinson. Esto surge de la elección del tamaño de la turbina de gas, junto con una mayor eficiencia de la producción de electricidad para un ciclo combinado de turbina de gas en comparación con un ciclo de vapor (cuando ambos sistemas ofrecen la misma cantidad de vapor de proceso).
- La alta eficiencia de los sistemas BLGCC contribuye a un exceso de electricidad después de satisfacer las necesidades de electricidad de la fábrica. Por el contrario, las fábricas que utilizan sistemas de Tomlinson, tienen que comprar algo

de electricidad para satisfacer las demandas de la fábrica.

- La eficiencia del uso del combustible comprado por los sistemas de BLGCC es muy alta del 96%.

4.3. Discusión

El sistema BLGCC obtiene un mayor rendimiento eléctrico, con un exceso de potencia disponible a la red, una vez satisfecha la demanda interna, de 14,6 MW para la fábrica de referencia del estudio, que equivale a 9,24 KW de potencia disponible por cada tonelada de pasta seca producida, lo que significaría para la producción de pasta de papel española de 2011 a 12.012,65 MW de potencia.

En el gráfico 10 y 11 se puede ver una perspectiva de la potencia que estaría disponible a la red mediante el sistema de ciclo combinado de gasificación del licor negro frente a la potencia instalada en 2013 en España por tecnologías. Como se aprecia la potencia disponible del sistema BLGCC sería de un orden similar a la potencia suministrada por el carbón, mayor que la potencia suministrada por la energía nuclear y un poco inferior a la energía hidráulica.

Gráfico 10. Potencia instalada en España en 2013 por tecnologías y potencia que supondría el uso del BLGCC

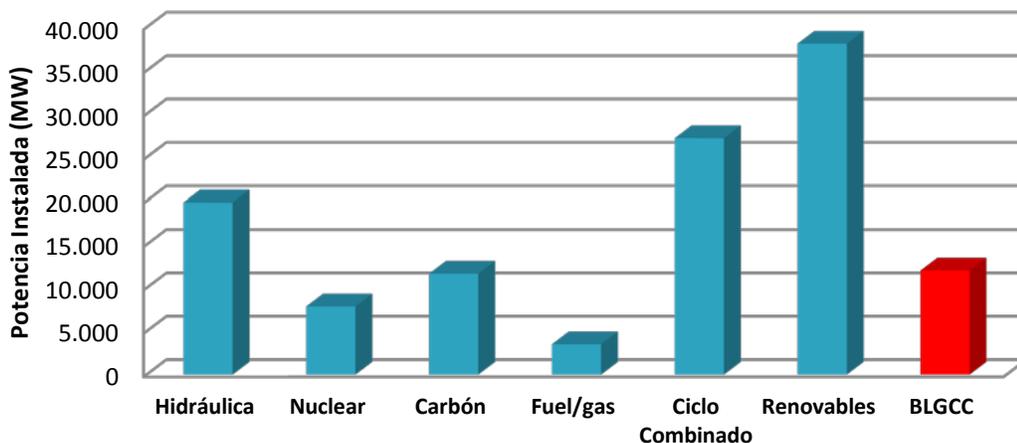
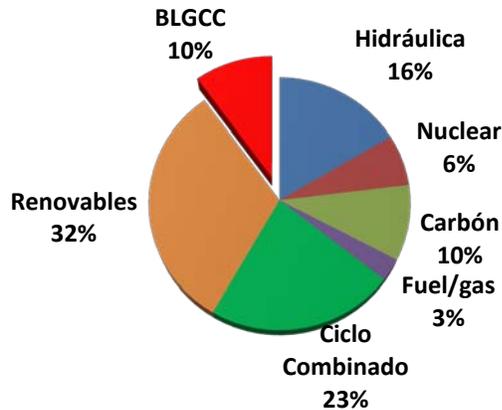




Gráfico 11. Potencia instalada en España en 2013 por tecnologías y potencia que supondría el uso del BLGCC en porcentaje

Fuente: Red Eléctrica Española.



El sistema BLGCC puede aumentar de manera muy significativa la eficiencia de recuperación de energía a partir de biomasa (licor negro) en la industria de la pasta de papel, traduciéndose en reducciones de emisiones de CO₂ importantes.

Con el sistema BLGCC, la industria de pasta de papel puede convertirse en un gran exportador de la electricidad.

Sin embargo, la inversión para una unidad de proceso BLG presurizado a gran escala es mayor que para una nueva caldera de recuperación convencional. Se estima que las primeras grandes unidades de demostración costarán dos a tres veces más de una caldera de recuperación convencional. BLG es 2-3 veces más caro en los costes de capital en relación a una caldera de recuperación convencional. Los costes de capital para BLG se estimaron en \$ 200 - 500 millones (147-367 millones €), en comparación con \$ 100-150 millones (73,44-110,1 millones €) para sistema de recuperación convencional, los costes de operación y mantenimiento se estimaron en \$ 10-20 million (73,4-110,1 millones €). [16,19,22]

La mayor inversión que se requiere respecto a al sistema de recuperación convencional limitará la comercialización de BLG en la industria de la pasta y el papel.

CONCLUSIONES

La industria papelera se encuentra en una posición única, en términos de mejora de la eficiencia energética y de reducción de CO₂. La nueva tecnología de gasificación del licor negro supondrá un avance importante para el sector, teniendo la capacidad de convertirse en exportador de energía residual de su proceso, una vez superados los obstáculos económicos que supone la inversión.



Tabla A.1. Indicadores energéticos y medioambientales de la industria papelera española.

	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo de combustibles (en % sobre el total)					
Gas natural	74	60	64	63	61
Biomasa	23	36	34	35	37
Fuel oil	2	3	2	2	2
Carbón	1	1	0	0	0
Potencia instalada en cogeneración (MW)*	1.075	1.071	1.105	1.135	1.135
Emisiones de CO2					
Emisiones CO2 con origen en la cogeneración (Millones t)	3,4	3,3	3,6	3,5	3,3
Otras emisiones de CO2 (Millones t)	1,2	0,9	0,8	0,9	1,0
Generación de electricidad (Millones MWh)	6,7	6,6	7,3	7,2	7,0
Producción papel y celulosa (Millones t)	8,4	7,4	8,1	8,2	8,2
Generación de residuos sólidos en la industria papelera española (t)					
Residuos no peligrosos específicos de la actividad papelera	1.447.568	1.424.208	1.553.390	1.483.497	1.590.360
Otros residuos no peligrosos	82.961	85.435	86.851	110.326	154.420
Residuos peligrosos	9.026	9.348	2.349	2.452	3.069
Total	1.539.555	1.518.991	1.642.590	1.596.275	1.747.849
Vías de gestión de los residuos papeleros del proceso (en %)					
Vertedero	37,5	35,0	35,0	29,0	28,0
Uso directo agrícola	33,0	29,5	32,4	31,4	24,0
Compostaje	7,0	7,4	8,5	12,1	15,0
Cerámica	13,0	14,7	10,3	9,6	3,0
Cementera	6,0	5,1	6,7	7,7	2,0
Materia prima en otras industrias	1,0	0,8	0,4	0,7	2,0
Valorización energética en la propia fábrica	0,5	2,6	2,9	8,8	24,0
Otros destinos	2,0	4,9	3,8	0,7	2,0
Utilización total de agua y vertido unitario desglosado en celulosa y papel					
Utilización total de agua (millones de m3)	132,0	115,0	118,7	124,0	119,0
Vertido celulosa (m3/tonelada)					
Vertido papel (m3/tonelada)	35,2	33,3	31,9	32,5	29,0
Producción total de celulosa y papel (miles de toneladas)	8,3	8,4	7,8	7,6	8,0
	8.423	7.440	8.058	8.179	8.157
Tratamiento in situ del vertido en el Sector Paplero (en % sobre el total)					
Tratamiento primario	25	28	32	30	29
Tratamiento primario + secundario /	65	60	52	53	54
Tratamiento primario + secundario + terciario	10	12	16	17	17

Fuente: IDAE / ASPAPEL



Tabla A.2. Características de la fábrica de referencia. Consumo de combustibles (en % sobre el total)

SISTEMA		TOMLINSON	BLGCC
Producto (papel)	Tn métricas/día		1.725
Pasta de papel	Tn pasta seca/día		1.580
Mezcla Madera dura (HW)/madera blanda (SW)	%HW, %SW		65% HW, 35% SW
Madera al Proceso (91% del total)	Tn pasta seca/día	3.434	3.208
Combustible madera (biomasa) (9% del total)		340	317
Madera total usada		3.774	3.525
Concentración de sólidos del licor negro	% sólidos	80	80
Caudal sólidos licor negro (BLS)	lb BLS/día	6.000.000	5.419.646
	kg BLS/día	2.721.555	2.458.311
Contenido Energía licor negro (BL)	MJ/kg BLS, LHV (HHV)	12,46 (13,89)	12,31, (13,87)
	Btu/lb BLS LHV (HHV)	5.359 (5.974)	5.295 (5.966)
	MWt LHV (HHV)	392,6 (437,6)	350,7 (394,7)
Composición BLS, % en masa	C	33,46	32,97
	H	3,75	3,7
	O	37,35	36,88
	S	4,10	4,27
	Na	19,27	20,03
	K	1,86	1,93
	Ash/cloruros	0,21	0,22
Contenido Energía Combustible de la biomasa (50% de contenido de humedad)	MJ/kg biomasa, LHV (HHV)	8,14 (10,0)	8,14 (10,0)
	Btu/lb biomasa LHV (HHV)	3.501 (4.300)	3.501 (4.300)
	MWt LHV (HHV)	57,8 (71,3)	54,1 (66,6)
Vapor usado en la fabricación a 4 bar (incluyendo los evaporadores, pero excluyendo el área de recuperación)	kg / kg papel	3,384	3,207
	MWt	142,8	135,3
	MJ/mt papel	7.149	6.774
Vapor usado en la fabricación a 12 bar (incluyendo los evaporadores, pero excluyendo el área de recuperación)	kg / kg de papel	1,760	1,648
	MWt	69,3	64,8
	MJ/mt papel	3.469	3,247
Vapor total usado en la fábrica	MWt	212,1	200,1
Electricidad usada en la fábrica (excluyendo el área de recuperación)	KWh/mt papel	1.407	1.407
	MWe	100,1	100,1

Fuente: E. D. Larson.2003.



Tabla A.3. Resumen de los resultados estimados para todas las simulaciones de sistemas de potencia / recuperación.

SISTEMA	TOMLINSON	BLGCC
ENTRADAS DE COMBUSTIBLES (MW) (HHV)		
Subproductos combustibles de la fábrica	508,8	457,7
Licor negro	437,6	391,1
Biomasa (residuos de madera)	71,2	66,6
Combustibles comprados	33,1	85,9
Biomasa (HHV)	0	33,4
Gas natural para quemador de conducto (HHV)	0	14,3
Fuel oil para el horno de cal (HHV)	33,1	38,2
TOTAL ENTRADAS DE COMBUSTIBLES (MW) (HHV)	541,9	543,6
VAPOR A PROCESO (MW)		
Vapor Baja Presión a proceso (4 bar)	142,8	135,3
Vapor Baja Presión a proceso (12 bar)	69,3	64,9
Total vapor a proceso (MW)	212,1	200,2
ELECTRICIDAD (MW)		
Producción bruta de turbina de gas	--	87,0
Producción bruta de turbina de vapor	72,0	48,2
Expansión del gas de síntesis	--	0,0
Producción bruta total	72,0	135,1
Electricidad usada en área de recuperación	7,7	20,5
PRODUCCIÓN NETA POTENCIA (MW)	64,3	114,7
Potencia superior a Tomlinson	--	50,4
Uso en el proceso (excluyendo el área de recuperación)	100,1	100,1
Exceso de potencia disponible para la red	-35,8	14,6
EFICIENCIA (basada en HHV)		
(Vapor + Electricidad) / entrada total de combustible	0,51	0,579
Electricidad neta salida / entrada total de combustible	0,119	0,211
Eficiencia uso combustible comprado: (electricidad neta de BLGCC- electricidad neta de Tomlinson / (total de combustible comprado BLGCC- total de combustible comprado Tomlinson)	--	0,955
RATIOS DE ENERGÍA		
Salidas útiles / entrada total combustible: suma de vapor de proceso, la electricidad neta, y las salidas de combustible líquido dividido por la suma de todas las entradas de combustible.	0,574	0,654
Salidas / entradas exportables totales: suma de la electricidad neta y la producción de combustible, dividido por la suma de todas las entradas de combustible.	0,133	0,237

Fuente: E. D. Larson.2003.



REFERENCIAS

- [1] ACOGEN (2013) Cogeneración en la Industria Papelera
- [2] ASPAPEL. (2009) Informe estadístico.
- [3] Berglin, N., & Berntsson, T. (1998). CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis. *Applied thermal engineering*, 18(11), 947-961.
- [4] CEPI Key Statistics Pulp and Paper Industry in 2009
- [5] CEPI Key Statistics Pulp and Paper Industry in 2012
- [6] CEPI. Sustainability Report 2011
- [7] Consonni, S., Katofsky, R. E., & Larson, E. D. (2009). A gasification-based biorefinery for the pulp and paper industry. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(9), 1293-1317.
- [8] Dolf Gielen and Cecilia Tam, Energy Technology Policy Division International Energy Agency. (2006) Energy Use, Technologies and CO₂ Emissions in the the Pulp and Paper Industry
- [9] Eriksson, H., & Harvey, S. (2004). Black liquor gasification—consequences for both industry and society. *Energy*, 29(4), 581-612.
- [10] Farahani, S., Worrell, E., & Bryntse, G. (2004). CO₂-free paper?. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(4), 317-336.
- [11] Gallego, A. G., & Llagostera, J. (2005). Computational modeling and thermodynamic analysis of combined cycles using black liquor gasification.
- [12] IEA bioenergy, 2007. Black Liquor Gasification: Summary and Conclusions from the Bioenergy ExCo54 Workshop. Retrieved July 10th, 2010
- [13] IEA. (2007) Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions. Energy indicators.
- [14] Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau (2013), Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board
- [15] Kong, L. (2014). Emerging Energy-efficiency and Greenhouse Gas Mitigation Technologies for the Pulp and Paper Industry.
- [16] Larson, E. D., Consonni, S., & Katofsky, R. E. (2003). *A Cost-Benefit Assessment of Biomass Gasification Power Generation in the Pulp and Paper Industry: Final Report*. Princeton University.
- [17] Larson, E. D., Consonni, S., Katofsky, R. E., Lisa, K., & Frederick Jr, W. J. (2006). A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry Volume 1 Main Report. *Princeton University, Princeton, NJ*.
- [18] Larson, E., Consonni, S., Katofsky, R., 2006. A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry. Final Report, vol. 1. Princeton University and Politecnico di Milano.
- [19] Larson, E., Consonni, S., Kreutz, T., 2000. Preliminary economics of black liquor gasifier/gas turbine cogeneration at pulp and paper mills. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 122 (3), 255–261
- [20] Larsson, A., Nordin, A., Backman, R., Warnqvist, B., Eriksson, G., 2006. Influence of black liquor variability, combustion, and gasification process variables and inaccuracies in thermochemical data on equilibrium modeling results. *Energy & Fuels* 20, 359–363.
- [21] Lawrence, E. O. (2000). Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry
- [22] Lawrence, E. O. (2009). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry.
- [23] Martin, N., Anglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrell, E., & Price, L. K. (2000). Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the US pulp and paper industry. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [24] Martin, N., Worrell, E., Ruth, M., Price, L., Elliott, R. N., Shipley, A. M., & Thorne, J. (2000). Emerging energy-efficient industrial technologies. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [25] Möllersten, K., Yan, J., & Westermark, M. (2003). Potential and cost-effectiveness of CO₂ reductions through energy measures in Swedish pulp and paper mills. *Energy*, 28(7), 691-710.



- [26] N. Berglin, T. Bertntsson. CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 18 (1998), pp. 947–961
- [27] Naqvi, M., Yan, J., & Dahlquist, E. (2010). Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. *Bioresource technology*, 101(21), 8001-8015.
- [28] Pettersson, K., & Harvey, S. (2010). CO₂ emission balances for different black liquor gasification biorefinery concepts for production of electricity or second-generation liquid biofuels. *Energy*, 35(2), 1101-1106.
- [29] Sector Policies and Programs Division Office of Air Quality Planning and Standards United States Environmental Protection Agency (2010) Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Pulp and Paper Manufacturing Industry
- [30] T.Ekbom, M. Blom, N. Berglin, P. Ahlvik, 2003. Cost-competitive, efficient biomethanol production from biomass via black liquor gasification.
- [31] Van Heiningen, A. (2006). Converting a kraft pulp mill into an integrated forest biorefinery. *Pulp and Paper Canada*, 107(6), 38-43.
- [32] WHITTY, K. (2009). The changing scope of black liquor gasification. *45 YEARS RECOVERY BOILER CO-OPERATION IN FINLAND*, 133.
- [33] Wising, U., Berntsson, T., & Stuart, P. (2005). The potential for energy savings when reducing the water consumption in a Kraft Pulp Mill. *Applied Thermal Engineering*, 25(7), 1057-1066.