

REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS THROUGH IMPROVING HOOD INSULATION IN PAPER MANUFACTURING

Calvo, Luis Miguel¹; Domingo, Rosario²

¹ Universidad Pública de Navarra, ² UNED

Pulp and paper industry is an energy-intensive production process, both electricity and heat. This process is fundamentally a mechanical process by this fact consumes most of the energy as electricity (pulp production, machinery drive, vacuum systems). Another significant portion of energy consumed is used in the form of thermal energy for drying paper, mainly in the dryer section, through a hood that insulates the drying section. This hood may lose insulated sealing that can cause significant energetic losses that affect to emissions CO₂ per product.

This paper analyzes the current state of a closed hood to quantify losses at the facility insulation fault, improper adjustments of parts and impairments access systems.

To carry it out we have used thermographic systems, which show faults close and damage caused in the installation with the opening and closing thereof for the normal operation and maintenance issues of the section.

We have identified poorly insulated or not engaged properly areas, estimate the energy losses depending on the outside temperature of manufacturing hall, have compared this energy losses with the thermal energy consumption used to dry the paper and have looked for the influence of this losses on emissions CO₂ per product.

Keywords: *Manufacturing; Emissions; Improvement*

REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂ MEDIANTE LA MEJORA DEL AISLAMIENTO DE LA CAMPANA DE SECADO EN LA FABRICACIÓN DE PAPEL

La fabricación de papel es un proceso con uso intensivo de energía, en forma de electricidad y de calor. Tiene un proceso fundamentalmente mecánico, por lo que parte del consumo energético se hace en forma de electricidad (producción y depuración de la pasta, accionamiento de maquinaria, sistemas de vacío). Otra parte se utiliza como energía térmica para el secado del papel, concentrada en la sección de sequería, que consta de una campana, que aísla del exterior la zona de secado, y que puede perder estanqueidad provocando pérdidas energéticas que afectan a las emisiones de CO₂ por producto.

Se analiza la instalación para cuantificar las pérdidas por fallos de aislamiento, ajustes inadecuados de piezas y deterioros de los sistemas de acceso. Para realizarlo, se emplea un sistema termográfico, que permite estudiar las diversas secciones, los fallos de cierre y deterioros producidos en la instalación y en las operaciones de apertura y cierre, de operación y mantenimiento.

El análisis identifica las zonas deficientemente aisladas o mal encajadas, se estiman las pérdidas horarias en función de la temperatura exterior, se compararan con el consumo de energía y se analiza su influencia en las emisiones de CO₂ por producto fabricado.

Palabras clave: *Fabricación; Emisiones; Mejora*

Correspondencia: rdomingo@ind.uned.es

1. Introducción

Las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía térmica se han convertido en un problema de dimensiones globales por dos razones principales, la contaminación ambiental producida por las propias emisiones y el consumo de energía vinculado a las mismas.

La fabricación de pasta y papel es un proceso de producción industrial con un uso intensivo de energía, tanto en forma de electricidad como de calor. Estas plantas se caracterizan por poseer un proceso fundamentalmente mecánico, por lo que una parte muy significativa del consumo energético se hace en forma de electricidad (producción y depuración de la pasta, accionamiento de maquinaria, sistemas de vacío, etc.) y la otra parte significativa de energía se utiliza en forma de energía térmica para el secado del papel, concentrada en este caso casi en exclusiva en la sección de sequería.

Se ha estudiado la relación entre la sección de sequería y las emisiones de CO₂ desde diversos ámbitos. Calvo y Domingo (2013a) hicieron una aproximación al introducir las emisiones de CO₂ "t CO₂ / t Papel" como indicador de eficiencia del proceso. Kong et al. (2013) identificaron en su estudio dentro de la sección de sequería 3 de las 8 zonas dentro de una planta de producción de papel (campana de sequería, recuperación de calor de los gases de salida y control de humedad de la propia campana de secado del papel), como potenciales zonas de reducción del consumo de energía y reducción de las emisiones de CO₂.

Del Río González (2005) ya identificó al sector de fabricación de papel como un sector muy tecnológico, pero reacio a realizar cambios en su maquinaria y estructura de fabricación si no está suficientemente contrastado el resultado de su implementación. Este hecho hace que en la mayoría de las plantas de fabricación de papel, los equipos en general y la sección de sequería en particular, tengan una notable antigüedad (más de 10 años en la mayoría de los casos). Esto puede provocar que el deterioro de las instalaciones traiga como consecuencia una pérdida de rendimiento, un incremento del consumo de energía y de las emisiones de CO₂ asociadas a dicho proceso de secado.

Hay tres tecnologías principales de sección de sequería respecto a la campana de secado del papel, campana abierta (prácticamente en desuso), campana semi-abierta y campana cerrada. Esta última utiliza entre un 15 y un 20% menos de energía térmica en forma de vapor que la semi-abierta (Kong et al., 2013) y reduce hasta un 40% el consumo energético de los sistemas de extracción y soplado de aire caliente a la misma.

La campana de sequería es una instalación que recubre y aísla del exterior la zona de secado del papel. Dicha campana cuenta con puertas de acceso para vigilar el funcionamiento, para intervenir en roturas de papel y paneles desmontables para acceder en caso de avería. Debido a los materiales con los que está construida, con el proceso de montaje y desmontaje, la campana puede perder estanqueidad. Este deterioro provoca pérdidas significativas de energía que afectan al indicador "t CO₂ / t Papel" analizado.

1.1. Antecedentes

El concepto de sostenibilidad ha sido relacionado con la eficiencia en producción (Aguado, Alvarez & Domingo, 2013), aunque no así con el mantenimiento. La información publicada sobre el análisis del proceso de secado del papel, pone de manifiesto la influencia de este proceso en las características mecánicas del papel (Karlsson, 2000; Hostettler, Pelletier & Cloutie, 2005; Bicudo, 2008; Triantafillopoulos, 2010). También se analizan los nuevos sistemas para mejorar la eficiencia de la sequería (Martin, Drotz et al., 2004; Laurijssen et al., 2010) así como la influencia de cada uno de los elementos en el proceso de secado (Barber, 2011). Hay numerosos estudios sobre el aspecto energético de la sequería (Sivill, Ahtila & Taimisto, 2005; Zvolinschi, Johannessen & Kjelstrup, 2006) y su análisis para

minimizar las pérdidas de energía, maximizando la recuperación de la energía contenida en los flujos de aire de extracción del interior de la propia campana de secado (Sivill & Ahtila, 2009; Laurijssen et al., 2010).

Las emisiones de CO₂ generadas en los procesos industriales, se ven afectadas de manera muy significativa por el estado de la instalación de aprovechamiento térmico del proceso y los parámetros de funcionamiento del proceso de consumo de la energía térmica. En este proceso de secado térmico se producen emisiones atmosféricas entre las que la más importante por su volumen e impacto lo constituyen las emisiones de CO₂. La limitación de las emisiones de CO₂ propuesta por el actual protocolo de Kioto, al que la Unión Europea está adherida, supone una limitación al consumo de fuentes de energía que generan emisiones y como consecuencia de esta limitación el proceso productivo se ve afectado de manera muy significativa.

En la puesta en marcha de la tercera fase del protocolo de Kioto, en el que se elimina en general la gratuidad de los derechos de emisión hace que el seguimiento y control de las emisiones de CO₂ se haga más necesaria todavía.

1.2. Objetivos

En un estudio previo (Calvo & Domingo, 2013a) introdujeron un indicador que relacionaba las emisiones de CO₂ generadas en el proceso de fabricación de una unidad de producción de papel ("t CO₂ / t Papel"), con el objetivo de ver la relación entre él y las variables de disponibilidad de máquina debidas al mantenimiento. El resultado obtenido permitía afirmar que esta ratio podía ser útil para identificar variables que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad de la planta, pero que requería de un análisis de datos diarios.

En estudios posteriores (Calvo & Domingo, 2013b) se puso de manifiesto que, además de la eficiencia de producción, hay otras variables en el proceso de fabricación de papel que influyen en el indicador. Estas variables identificadas son las características del producto fabricado, debido a la diferente composición de la materia prima empleada, y el gramaje de papel.

En este sentido, se continuaron los estudios en el que se analizaban aspectos técnicos de la producción del papel y las variables del proceso que tienen influencia y cuáles de ellas son más significativas respecto al indicador considerado.

Este estudio se centra en analizar el estado de la infraestructura empleada en el secado térmico del papel, denominada campana de sequería. Intentaremos determinar qué porcentaje de las emisiones de CO₂ producidas en el proceso de secado térmico del papel se pueden reducir mediante la mejora del estado del cerramiento y/o el aislamiento de la campana de secado.

El objetivo de este estudio es validar un método para encontrar fallos de aislamiento, que permitan actuar para mejorar la eficiencia del proceso. De manera indirecta se determinará qué cantidad de emisiones se pueden reducir y como esta reducción afecta al indicador definido por Calvo y Domingo (Calvo & Domingo, 2013a y 2013b) "t CO₂ / t Papel".

2. Metodología

El estudio analizará el estado actual de una campana cerrada para cuantificar las pérdidas en la instalación por fallos de aislamiento, ajustes inadecuados de piezas y deterioros de los sistemas de acceso como puertas automáticas, puertas manuales, ajuste de paneles de cierre, etc.

2.1. Descripción del proceso de producción de papel.

La máquina de papel, sobre la que se hace este estudio, tiene un ancho útil de producción de papel de 2000 mm y una capacidad de producción de 55.000 t al año. Emplea como materia prima papel 100% reciclado post-consumo. Produce papel denominado cartón sin estucar con gramajes comprendidos entre 200 y 650 g/m² indicado según ISO 536, la norma de referencia en el sector (ISO 536, 2012).

La producción de papel en la planta, se puede dividir en 5 fases, como muestra la Figura 1:

1. Preparación de pasta. Las fibras de papel son mezcladas con agua y aditivos químicos, para dar las características necesarias tanto en la calidad de las fibras, como en la consistencia (densidad) y características químicas de la disolución.
2. Sección de formación de la hoja. Después de haber preparado la pasta de papel con las características necesarias, se forma la hoja por diversas tecnologías. Básicamente consiste en depositar la pasta lo más uniformemente posible sobre una tela sinfín, en la que se elimina el agua de la hoja primeramente por gravedad y posteriormente por medio de vacío.
3. Sección de prensas. Posteriormente la hoja de papel entra en la sección de prensas, donde la eliminación de agua se realiza por medios mecánicos (principalmente prensado). En esta sección se alcanza una sequedad aproximada del 45%, que corresponde a un contenido de agua o humedad del 55% en peso.
4. Sección de sequería. El agua que todavía queda en la hoja de papel, es decir la humedad entorno al 55%, se elimina por procesos térmicos hasta obtener la sequedad final entorno al 6-7,5%, en función del tipo de papel y de los requisitos del cliente.
5. Sección de terminado. En una máquina de calandrar, se dan las características superficiales requeridas al papel. En esta sección no hay cambio de humedad.

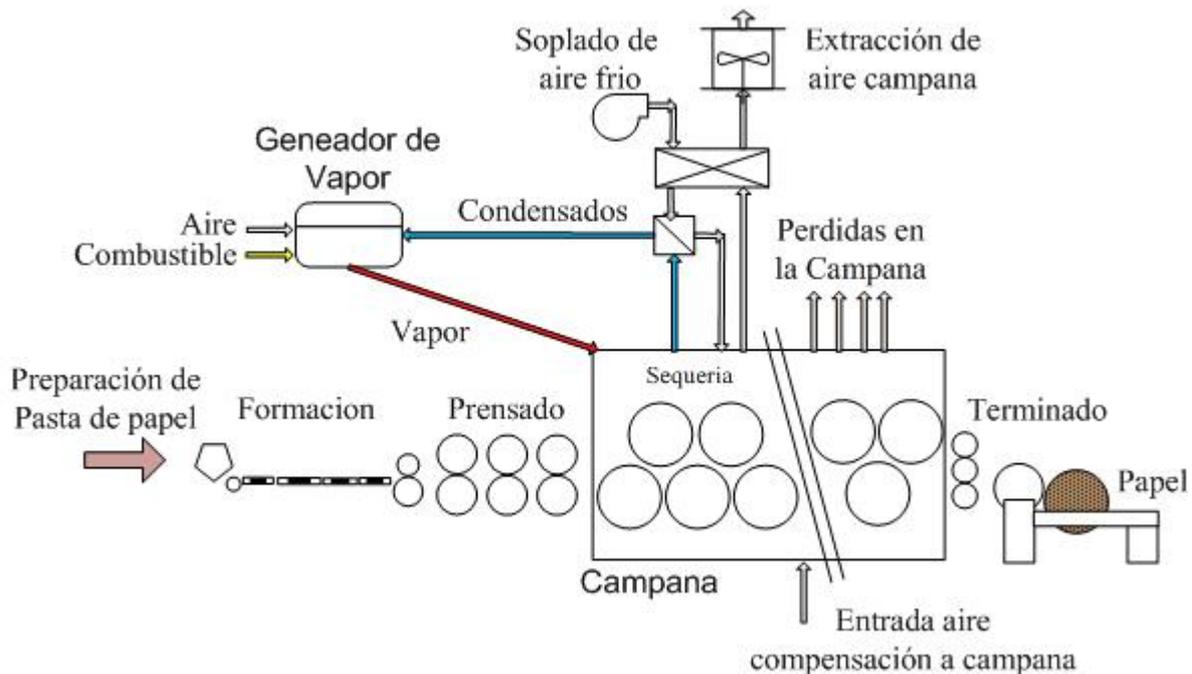
La sección de sequería (sección 4) es la parte del proceso de la fabricación de papel donde se elimina el agua de la hoja por medios térmicos. Nos centraremos en el estudio en esta sección, responsable de las emisiones de CO₂, procedentes de la combustión del gas natural empleado en la generación de vapor. En este caso en particular, estas emisiones de CO₂ son las únicas sometidas al comercio de derechos de emisión y corresponden al 100% de las emisiones verificadas y declaradas anualmente por la planta industrial.

La sequería objeto de estudio está compuesta por 38 cilindros secadores calentados internamente por vapor. La energía contenida en el vapor se transmite a la hoja al entrar en contacto con los cilindros secadores. El calentamiento de la hoja y del agua que contiene, provoca la evaporación del agua y el secado de la hoja. La eliminación del agua evaporada de la hoja de la sequería, se realiza mediante un sistema de ventilación que controla las variables asociadas al aire en circulación en el interior de la campana. La extracción de aire de campana cuenta con un sistema de recuperación de calor que minimiza el uso de energía necesaria, y que afecta directamente a las emisiones del proceso.

La sección de sequería, como se puede observar en la Figura 2, está aislada del exterior mediante una campana construida con paneles compuestos por dos capas de aluminio de 0,7 mm, con lana de roca en su interior y montada sobre una estructura fija. Para las operaciones de supervisión, cuenta con puertas automáticas en la zona denominada de mando o supervisión y otras puertas manuales en la zona denominada de accionamiento. Dispone también de paneles laterales y techos de cierre desmontables para realizar operaciones de mantenimiento.

Se comienza el estudio con el análisis de los flujos de aire presentes en la nave de fabricación, donde esta ubicada la sección o campana de secado del papel. Con ayuda del diagrama psicrométrico de Mollier se determina la entalpía total (E_t), a partir de las variables conocidas de temperatura de bulbo seco (T_i) y humedad relativa (H_r), de cada flujo de aire de la nave de fabricación. La nave de fabricación en la que está ubicada la sequería no cuenta con sistema de calefacción, por lo que puede considerarse que la fuente de energía que hace variar la entalpía de las corrientes de aire salientes lo constituyen las pérdidas de calor de la campana de secado.

Figura 1. Esquema del proceso



Una vez conocida la energía perdida se localizarán las fuentes de calor. Para llevarlo a cabo se empleará un sistema ampliamente utilizado en otros sectores, pero del que no se conoce aplicación para este tipo de mantenimientos. Se basa en el estudio de las imágenes termográficas de las diversas secciones de la campana, que ponen de manifiesto los fallos de cierre y deterioros producidos en la instalación a lo largo de los años. Estos deterioros provienen principalmente por las operaciones de apertura y cierre de la misma, para las actividades habituales de funcionamiento y mantenimiento de la sección.

2.2. Cálculo de los flujos de aire

Como se ha indicado en el apartado 2.1, se toma como base para el estudio una planta de fabricación de papel descrita en este apartado. La nave de fabricación estudiada tiene forma rectangular de 17 m de ancho y 142 m de largo. Dispone de un tejado a dos aguas en la que la cumbre está situada en el centro de la nave y a una altura total desde el suelo de 9 m. El volumen total de la nave es de 18.126 m³.

La nave dispone como salidas forzadas de aire 4 extractores situados en el techo, concentrados tres de ellos en el primer cuarto longitudinal de la nave (en la sección de preparación y dosificación de aditivos del papel), y el cuarto extractor está situado en la parte final de la nave junto a la sección de corte y bobinado del papel. Entre ambos conjuntos de extractores están situadas las aperturas del techo responsables de lo que

posteriormente se determinará como caudal a través de huecos debido al efecto termosifón o tiro de chimenea.

De los extractores indicados se conocen las características técnicas, curvas de consumo y caudal de aire (en m³/s), mediante las cuales se determinarán el caudal de aire, partiendo del consumo eléctrico del motor y la propia curva característica de funcionamiento del ventilador.

- Extractor 1: 6,89 m³/s
- Extractor 2: 6,81 m³/s
- Extractor 3: 5,53 m³/s
- Extractor 4: 2,81 m³/s

Para la determinación del caudal a través de huecos debido al efecto termosifón o tiro de chimenea, es preciso tener en cuenta que la nave dispone de los siguientes huecos de entrada de aire a nivel "0 m" de la nave:

- Siete ventanas a nivel del suelo con una superficie unitaria de 0,7 m² cada una, distribuidas uniformemente en los 142 m de longitud de la nave.
- Cuatro accesos desde la planta sótano hacia la nave de fabricación, los cuales tienen apertura de mucha mayor sección desde el exterior al sótano que la apertura que el sótano tiene hacia la nave. Estas aperturas en el sótano tienen el objetivo de mantener una sobre-ventilación, que evite la contaminación de la atmósfera. En este caso únicamente como medida de prevención en el acceso del personal en las operaciones habituales de control y mantenimiento de la maquinaria situada en dicha estancia.
- Puerta de acceso desde el pasillo de la zona de pastas hacia la nave de fabricación de 3,0 m².
- Puerta de comunicación de almacén y nave de fabricación, de 12,5 m² (con unas dimensiones de 3,5·3,5 m² necesario debido al acceso de las carretillas elevadoras, que transportan el producto terminado desde la nave de fabricación hasta el almacén de producto terminado).
- Puerta de cuarto de dosificación de almidón, paso peatonal de 2,4 m².
- Puerta de acceso de zona de preparación de pastas (sección 1 descrita en el punto 2.1) a la nave de fabricación para paso peatonal de 2,4 m².
- A nivel "9 m" de la nave dispone, a parte de los extractores de aire, de los siguientes huecos:
 - Hueco de panel desmontable, para sacar prensa de la zona húmeda y junto a la sección de sequería de 2,5 m².
 - Hueco en cumbrera de nave, encima de campana de secado, de 6 m².
 - Hueco libre en la salida de conductos de aire desde la campana de secado hasta los intercambiadores de tejado de 7,5 m².

Para el cálculo de la diferencia de presión (ΔP en Pa) debido al efecto termosifón, causante del tiro de las chimeneas y que depende de la diferencia de densidades del aire según la temperatura interior del aire T_i y la temperatura exterior del mismo T_e (ambas en K) y de la diferencia de altura entre dichos huecos (Δh), siguen la Ecuación (1).

$$\Delta P = 35,98 \cdot \Delta h \cdot (1/T_i - 1/T_h) \quad (1)$$

En el cálculo del caudal de aire, a través de los huecos, se seguirá el caso teórico de una placa delgada con una sección A (m^2), el caudal Q (m^3/s) viene dado por la Ecuación (2).

$$Q = 0,827 \cdot (A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) \cdot [\Delta P / (A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n)]^{0,5} \quad (2)$$

El caudal obtenido a través de los huecos y por la diferencia de altura, es de $6,72 m^3/s$.

Se han medido también las principales variables del aire, como su temperatura (T_i) y humedad relativa (Hr). Para determinar el resto de las características del aire se empleará el diagrama de Mollier. El objetivo principal es determinar su entalpía (kJ/kg), que se empleará como base para el cálculo de la energía que aporta campana sequería a la corriente de aire, desde su entrada en la nave de fabricación y antes de ser extraído.

Otra corriente de aire a considerar lo constituyen los insumos de la campana de secado. La campana cuenta con dos extractores de aire caliente del interior de la campana y un ventilador que insufla aire caliente a la misma, que se calienta aprovechando la energía térmica contenida en la corriente de aire de salida. De los extractores indicados y del ventilador de soplado se conocen todas las características técnicas, incluidas las curvas de consumo caudal de aire (en m^3). Se determinará el caudal de aire partiendo del consumo eléctrico del motor y la propia curva característica de funcionamiento del ventilador. La diferencia entre la extracción y soplado se determina en $7,08 m^3/s$. Este caudal de aire se emplea en el proceso y no se tiene en cuenta en el cálculo de las emisiones asociadas a él. El análisis de las condiciones internas de campana y los flujos de aire y energía térmica suministrada en forma de vapor quedan fuera del alcance de este estudio.

2.3. Cálculo de la entalpía del aire

Se han medido la temperatura (T_i) y humedad relativa (Hr) del aire a la entrada de la nave y en cada una de las salidas (extracciones forzadas y por termosifón). La diferencia entre ambas entalpías que se han determinado por medio del diagrama de Mollier, servirá para determinar la energía aportada a la corriente de aire dentro de la nave de fabricación.

La fuente significativa de aporte de energía a las distintas corrientes de aire, lo constituyen principalmente las pérdidas de energía de la campana de aislamiento de la sequería.

2.4. Cálculo de las “Emisiones de CO_2 ” asociadas al consumo y las pérdidas de energía

Para el cálculo de la energía aportada al aire se tendrá en cuenta la entalpía del aire a la entrada de la nave de producción, con sus características específicas de temperatura (T_i) y humedad relativa (Hr) y la entalpía del aire en cada una de las salidas de la nave de fabricación con sus características de temperatura (T_i) y humedad relativa (Hr). La diferencia entre la entalpía de entrada y la de salida corresponde al aporte de energía, debido principalmente a las pérdidas de energía debidas a las deficiencias de aislamiento de la campana de sequería.

Los datos usados en el estudio, han sido recopilados con una frecuencia adecuada, y se han comparado con los medidos de acuerdo a la legislación española vigente (Real Decreto 1315/2005, Ley 1/2005, Decisión 2007/589/CE), corresponden principalmente a los relativos a producción y emisiones.

Las emisiones de CO_2 asociadas a la pérdida de energía, se calculan a través de los TJ de energía aportada a los flujos de aire caliente y que son extraídos tanto forzosamente como por el caudal perdido por los huecos de la nave. Estos TJ tienen el origen en las pérdidas de aislamiento de la campana. La energía de la campana proviene de la energía producida en la caldera de generación de vapor y que suministra el vapor a la sección de sequería. Esta caldera de generación de vapor emplea como fuente de energía única y exclusivamente gas

natural. Las emisiones se pueden calcular entonces mediante la Ecuación (3), en las que se tienen en cuenta los TJ aportados de energía al aire y los factores de emisión asociados al consumo de gas natural, necesarios para calentar dicho aire.

Posteriormente se calcularán las pérdidas de energía/emisiones en el aire de extracción de la nave con el indicador establecido definido por Calvo y Domingo (Calvo & Domingo, 2013a y 2013b) “t CO₂ / t Papel” y se determinará la relevancia que las pérdidas de energía de los flujos de aire tienen respecto al indicador general definido.

El indicador establecido por Calvo y Domingo (Calvo & Domingo, 2013a y 2013b) “t CO₂ / t Papel”, se obtiene como ratio entre las emisiones de CO₂ verificadas en cada periodo considerado y las toneladas de papel producido en la planta (su instalación) en el mismo periodo. En este caso se considerarán las emisiones asociadas a la media de producción anual de papel, en funcionamiento habitual, con las emisiones asociadas al calentamiento de aire de extracción en el mismo periodo considerado.

Para cuantificar las emisiones de CO₂ a través de la energía consumida/perdida, se sigue la metodología indicada en el apartado “Cálculo de emisiones y los factores de emisión” procedente del Informe Inventarios GEI (Ministerio de Medio Ambiente, 2011) para la Aplicación de la Directiva de Comercio de Emisiones y que se refleja en la Ecuación (3).

Datos actividad (Da), corresponde a la energía consumida (TJ) por la sequería en el periodo considerado, para el caso de las emisiones directas, y por la energía neta aportada a los gases de extracción de nave en el caso de las pérdidas de energía.

Factor de Emisión (Fe), se utilizará el indicado por España en el último inventario nacional presentado a la Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Factor de Oxidación (Fo), se utilizará el valor 1.

En el cálculo de Datos Actividad (Da), en el caso de las emisiones globales de la planta, se tiene en cuenta el caudal de vapor suministrado en el periodo considerado, la diferencia de entalpía entre el vapor suministrado a la sequería (suministrado a la temperatura (T_v) y presión (P_v)) y la entalpía del retorno de condensados de sequería (a temperatura (T_c) y presión (P_c)).

El factor de emisión (Fe) y factor de oxidación (Fo) procedentes del “Informe Inventarios GEI 1990-2009 (2011) Anexo 8, Factores de Emisión de CO₂ y PCI de los Combustibles”

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ (t)} = Da \text{ (TJ)} \cdot Fe \text{ (t CO}_2\text{/TJ)} \cdot Fo \quad (3)$$

El cálculo de la producción de la subinstalación para establecer el indicador en los periodos de referencia, se hará siguiendo las directrices indicadas en las guías metodológicas de ECOFIS para la Comisión Europea (European Commission, 2011a, 2011b).

Este estudio se basa en datos de producción del año 2012, periodo representativo de la planta pues no se han cambiado las condiciones de máquina ni se han realizado reformas que modifiquen su capacidad de producción.

3. Resultados

Siguiendo lo indicado en el apartado metodología, en la Tabla 1 se indican los datos de partida para cada flujo de aire y en la Tabla 2 los resultados de los cálculos de la energía para cada uno de los flujos de aire saliente de la nave, así como la energía del aire de entrada a la nave para compensar dichas salidas.

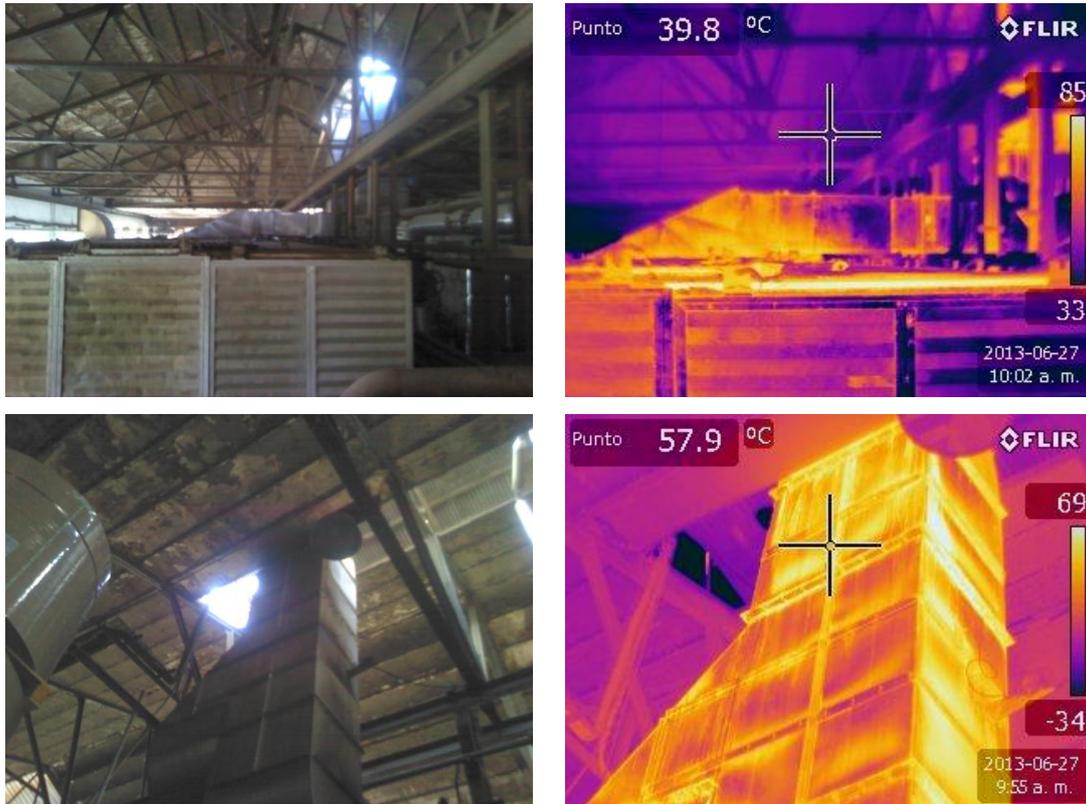
No son objeto de estudio los flujos de aire correspondientes al vacío de mesa ni a los insumos de campana. Como se puede observar, la nave se encuentra en un estado de fuerte depresión, lo que provoca fuertes corrientes de aire frío provenientes del exterior.

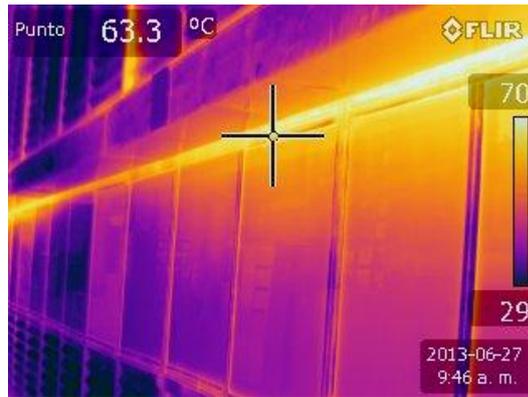
Con la información recogida en las Tablas 1 y 2, se aprecia que el déficit de aire total a compensar en la instalación son 43,33 m³/s. El caudal saliente por los extractores y apertura de techo es de 28,75 m³/s.

Tabla 1. Datos partida de flujos de aire

Salidas / Entradas de aire	Tipo	Temperatura (°C)	Hr (%)	g H ₂ O/kg aire seco	Presión atmosférica (Pa)	Densidad (kg/m ³)	Caudal (m ³ /s)
Extractor 1	Salida	30	20	5	101.325,0	1,0	6,89
Extractor 2	Salida	30	20	5	101.325,0	1,0	6,81
Extractor 3	Salida	35	20	7	101.325,0	1,0	5,53
Extractor 4	Salida	35	10	4	101.325,0	1,0	2,81
Apertura techo	Salida	60	10	13	101.325,0	1,0	6,72
Vacío mesa	Salida	30	80	22	101.325,0	1,0	7,5
Insumos de campana	Salida	85	20	77	101.325,0	1,1	7,08
Aire exterior	Entrada	13,5	12	2	101.325,0	1,0	43,33

Figura 2. Imágenes termográficas





Teniendo en cuenta la entalpía de cada flujo, la energía, añadida al aire que entra en la nave y sale de ella por los extractores y la apertura del techo, es de 3.302.300 kJ.

La media de producción horaria de fábrica es de 5,75 t/h, la única fuente de energía empleada en el secado del papel lo constituye el vapor generado en una única caldera. El suministro de gas a la planta se realiza en un solo punto y el único consumo de gas es el de la caldera de generación de vapor para la sequería.

Tabla 2. Energía para cada flujo de aire

Salidas / Entradas de aire	Caudal (m ³ /s)	Entalpía (kJ/kg)	Energía (kJ)
Extractor 1	6,89	44	1.091.200
Extractor 2	6,81	44	1.078.000
Extractor 3	5,53	44	875.600
Extractor 4	2,81	45	454.500
Apertura techo	6,72	95	2.299.000
Vacío mesa	7,5	85	2.295.000
Insumos de campana	7,08	240	6.120.000
Aire exterior	43,33	16	2.496.000

El consumo medio en kWh para la producción de papel es de 1.190 kWh. Con estos datos, se calcula en la Tabla 3 la parte de consumo energético perdido en el aire de extracción y que corresponde al 13,41% de la energía total empleada en el secado térmico del papel.

Tabla 3. Balance de emisiones

	kWh	Emisiones CO ₂		%
	hora	hora	total año	
Pérdidas por extracción	917,31	0,165842	1.333,37	13,41
Consumo total de energía	6.842,50	1,237069	9.946,04	

El aire evacuado por los extractores 1, 2, 3, 4 y por los huecos de techo se compensan con el aire que entra del exterior por los huecos descritos en el apartado 2. El calentamiento de dicho aire se produce por las pérdidas de aislamiento de la campana de la sequería.

Para determinar el origen de las pérdidas se emplean las imágenes termográficas de la campana de secado.

En la Figura 2 se puede observar el estado exterior de la instalación de campana que aparentemente es correcto. En la Figura 2 se puede observar también las imágenes termográficas de la zona superior de la campana y de la zona próxima al extractor número 4.

Con esta técnica se ha podido identificar las zonas de mayor pérdida de energía y se ha podido realizar una planificación del mantenimiento de la instalación para reducir las pérdidas cuantificadas en la Tabla 3.

4. Conclusiones

Con la identificación de los posibles ahorros debido a las pérdidas de energía aportadas a los flujos de extracción de aire, se ha puesto de manifiesto las pérdidas de campana en la zona próxima a los extractores y a los huecos del techo.

Se han cuantificado esas pérdidas y suponen un 13,41% de las emisiones totales de la planta, por lo que el impacto en el indicador considerado es muy significativo.

Una primera revisión de las imágenes termográficas muestra el estado de la campana. Con estas imágenes se puede priorizar la reparación en función de la superficie de la zona defectuosa y la diferencia de temperatura entre el conducto y/o sección y la temperatura de la nave. Este método permite comprobar también que hay numerosas zonas en las que el aislamiento no está en buenas condiciones o incluso es inexistente, lo que produce las pérdidas de energía cuantificables y que se transmiten desde el interior de la campana al exterior.

5. Referencias

- Aguado, S., Alvarez, R. & Domingo, R. (2013). Model of efficient and sustainable improvements in a lean production system through processes of environmental innovation. *Journal of Cleaner Production*, 47, 141-148.
- Barber, E. (2011). Xerium Dryer Fabric Cleaning, [Internet] Disponible en www.xerium.com.
- Bicudo, L. C. (2008). Avalaioes na área de secagem e sua influencia na qualidade do papel. *Revista Técnica Opapel*, 4, 48-56.
- Calvo, L.M., Domingo, R., (2013a). A first approach to the use of CO₂ emissions as a maintenance indicator in industrial plants. Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference – Zaragoza, Spain.
- Calvo, L.M., Domingo, R., (2013b). CO₂ emissions and its relationship with the product quality and process availability. Proceedings of the 17th International Congress on Project Management and Engineering, Logroño, Spain.
- Chand, G. & Shirvani, B. (2000). Implementing of TPM in cellular manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 149-154.
- del Río González, P. (2005). Analysing the factors influencing clean technology adoption: A study of the Spanish pulp and paper industry. *Business Strategy and the Environment*, 14, 20–37.
- España. Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. *Boletín Oficial del Estado*, de 10 de marzo de 2005, núm. 59, pp. 8405-8420.
- España. Ley 13/2010, de 5 de Julio, que modifica la Ley 1/2005 que regula el régimen de comercio de derechos de emisión. *Boletín Oficial del Estado*, de 5 de julio de 2010, núm. 163, pp.59586-59627.
- España. Ministerio de Medio Ambiente. Informe Inventarios GEI Mayo 2011, Anexo 8, Referencia del Inventario para la Aplicación de la Directiva de Comercio de Emisiones” Ministerio de Medio Ambiente. [Internet] Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/el-comercio-de-derechos-de-emision-en-espana/seguimiento-y-verificacion-de-las-emisiones/val_cal_net_inv_nac_emi.aspx
- España. Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, que establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero

- en instalaciones. *Boletín Oficial del Estado*, de 9 de noviembre de 2005, núm. 268, pp. 36674-36677.
- España. Real Decreto 1370/2006, de 24 de Noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. *Boletín Oficial del Estado*, de 25 de noviembre de 2006, núm. 282, pp-41320-41440.
- España. Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. (C de E en BOE 217 de 08/09/04). *Boletín Oficial del Estado*, de 7 de septiembre de 2004, núm. 216, pp. 30616-30642.
- España. Real Decreto 60/2005, de 21 de enero, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. *Boletín Oficial del Estado*, de 22 de enero de 2005, núm. 19, pp. 2666-2669.
- España. Real Decreto 777/2006, de 23 de Junio, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. *Boletín Oficial del Estado*, de 24 de junio de 2006, núm. 150, pp. 24001-24004.
- España. Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. *Boletín Oficial del Estado*, de 28 de agosto de 2004, núm. 208, pp. 30096-30111.
- Hostetler, R. E., Pelletier, D. & Cloutie, C. (2005). Effect of drying conditions on the development of binder strength in double coated SBS paperboard. Proc. of TAPPI Coating Conference.
- ISO 536, 2012. Paper and board - Determination of grammage. International Organization for Standardization, Ginebra.
- Karlsson, M. (2000). Papermaking part 2, Drying. *Papermaking Science and Technology series*, 9, 1-6.
- Kong, L., Price, L., Hasanbeig, A., Liu, H., Li, J., (2013). Potential for reducing paper mill energy use and carbon dioxide emissions through plant-wide energy audits: A case study in China. *Applied Energy*, 102, 1334-1342.
- Laurijssen, J., de Gream, F. J., Worrel, E. & Faaij, A. (2010). Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry. *Energy*, 35, 3738-3750.
- Lin, L. & Ni, J. (2009). Short-term decision support system for maintenance task prioritization. *International Journal of Production Economics*, 121, 195-202.
- Lin, L. & Ni, J. (2012). Decision support systems for effective maintenance operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 411-414.
- Martin, A., Drotz, M., Talja, R., Kiajaluto, S. & Puumalainen, T. (2004). Energy analysis of impulse technology; research-scale experimental papermaking trials and simulations of industrial applications. *Applied Thermal Engineering*, 24, 2411-2425.
- Nakajima, S. (1988). An Introduction to TPM. Productivity Press, Portland, OR.
- Sivill, L. & Ahtila, P. (2009). Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines – a case of study. *Applied Thermal Engineering*, 29, 3663-3668.
- Sivill, L., Ahtila, P. & Taimisto, M. (2005). Thermodynamic simulation of dryer section heat recovery in paper machines. *Applied Thermal Engineering*, 25, 1273-1292.
- Triantafillopoulos, N. (2010). Nano enhancers – Paper coating performance. *Revista TAPPI-PIMA, Noviembre – Diciembre*, 30-34.
- Unión Europea. Decisión no 2007/589/CE del Parlamento Europeo, de 18 de julio, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del consejo (2012). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, de 18 de julio de 2007, núm. 229.

- Unión Europea. European Commission – Climate Action, guías metodológicas ECOFIS, 2011a. [Internet] Disponible en http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/documentation_en.htm
- Unión Europea. European Commission, “Benchmarks for free allocation”, 2011b, Documentos de referencia y guías para el cálculo de asignación de derechos de emisión en los distintos procesos. [Internet] Disponible en http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/documentation_en.htm
- Zvolinschi, A., Johannessen, E. & Kjelstrup, S. (2006). The second-law optimal operation of a paper drying machine. *Chemical Engineering Science*, 61, 3653-3662.