

## ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN LA INDUSTRIA PAPELERA

Abdelrahman H. Hassan<sup>1</sup>, Jorge Payá<sup>1\*</sup>, Daniel Gómez-Elegido<sup>1</sup> y Miguel Sebastià<sup>2</sup>

1: Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética,  
Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

e-mail: jorge.paya@iie.upv.es

2: Hinojosa Packaging Group

Pol. Ind. Mas del Jutge, C/ Tonellet, 84-86, Torrente 46901, Valencia

**Resumen:** *El presente trabajo está enmarcado dentro del contexto del proyecto europeo PUSH2HEAT. En concreto, se han analizado las necesidades de calor en el rango de 90-150 °C, así como las fuentes de calor potencialmente disponibles. Mediante un análisis técnico-económico, se ha estudiado la viabilidad de la integración de una bomba de calor de alta temperatura (BCAT) de recuperación de calor en HINOJOSA (industria papelera). El calor residual es una corriente de aire húmedo a 68 °C. Se han considerado dos alternativas, una para generar vapor saturado a 4 bar(a), y la otra para producir agua caliente a 90 °C, resultando esta última más prometedora. Los resultados muestran un ahorro en el coste de operación anual, teniendo en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub>, de 580.845,2 €/año con un periodo de retorno descontado de 3,3 años.*

**Palabras clave:** industria papelera, recuperación de calor, análisis técnico-económico, bomba de calor de alta temperatura, absorción

## 1. INTRODUCCIÓN

El acuerdo verde europeo tiene como objetivo hacer que Europa sea neutra en carbono y eficiente en el uso de recursos para 2050. En este contexto, la industria debe desempeñar un papel importante en la transición energética para cumplir los objetivos de neutralidad climática. El aumento de la eficiencia energética mediante la recuperación y mejora del calor residual es el primer paso hacia la descarbonización en el sector industrial. La mayor parte del consumo de energía industrial final en la Unión Europea (UE) se debe a la demanda de calor, que representa alrededor de 2.390,0 TWh/año o el 81% de la demanda total de energía final industrial en la UE (2.950,0 TWh/año) [1]. La demanda de calefacción de procesos industriales es dominante y representa alrededor del 66 % (1.952,0 TWh/año en la UE en 2015) de la demanda total de energía final [2].

En el rango de temperatura de 100 a 200 °C, se requieren alrededor de 508,0 TWh/año o el 26 % de la demanda total de calor del proceso. Esto abre la puerta a la integración de diferentes tecnologías de recuperación de calor (TRC), como bombas de calor de alta temperatura (BCAT) o transformadores de calor de absorción (TCA), en el mercado industrial. Al combinar los dos segmentos de mercado para aplicaciones de hasta 100 °C y de 100 a 200 °C, las TRC podrían generar potencialmente 730,0 TWh/año o el 37 % del calor de proceso en la industria. En general, se ha identificado un gran potencial de aplicación para las tecnologías de BCAT en las industrias alimentaria, papelera y química/farmacéutica, en particular en procesos de secado, así como en pasteurización, esterilización, evaporación y destilación [3].

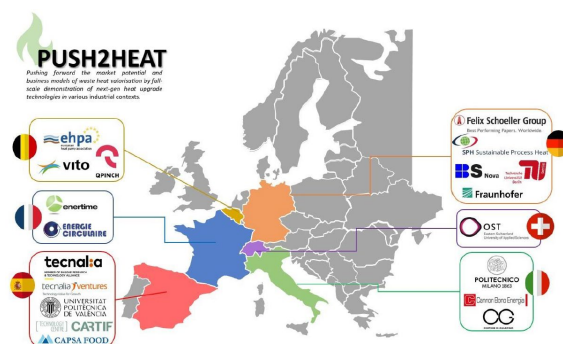


Figura 1. Consorcio PUSH2HEAT

Este trabajo está enmarcado dentro del contexto del proyecto europeo PUSH2HEAT [4] que tiene como objetivo impulsar el potencial de mercado y los modelos comerciales de las TRC mediante demostración a gran escala de sistemas de recuperación de calor en sectores industriales relevantes con un alto potencial de recuperación y mejora del calor residual, con una temperatura de suministro en el rango de 90-160 °C. El consorcio PUSH2HEAT está compuesto por 19 miembros de 6 países diferentes (Figura 1). El trabajo de la presente comunicación forma parte del WP5 del proyecto en que se enfoque en analizar la aplicación potencial de sistemas de recuperación de calor evaluados en diferentes sectores industriales. Diferentes estudios de replicación se realizarán para evaluar el impacto técnico-económico de estos sistemas en los sectores más representativos de la industria.

## 2. METODOLOGÍA

La integración de TRC en una planta del grupo de HINOJOSA es un ejemplo de los estudios de replicación analizados en el marco del proyecto PUSH2HEAT. HINOJOSA es un grupo español líder europeo en soluciones de embalaje sostenible; como embalajes de cartón ondulado, embalajes para destinado al consumidor final, foodservice y papel reciclado. Tiene 19 plantas entre España, Francia y Portugal, más de 2.500 empleados, y 820M € de facturación. La Tabla 1 resume el calor residual disponible, la demanda requerida (capacidad y nivel de temperatura) y la solución actual para satisfacer la demanda.

Basado en los datos de la empresa, se ha encontrado una oportunidad potencial para recuperar calor del aire caliente y húmedo residual de los procesos de pre-secado y post-secado. El aire residual es una mezcla entre dos corrientes: una a 71,2 °C con un caudal de 61.333,0 m<sup>3</sup>/h, y la otra a 61 °C con un caudal de 24.197,0 m<sup>3</sup>/h. Si solo se considera el calor sensible, el calor residual disponible debería ser ≈816,7 kW. Si se considera el calor total, entonces el calor residual disponible debería ser ≈3,0 MW. Durante el estudio se ha supuesto que la efectividad del evaporador es del 60% ya que es un intercambiador de tubos y aletas. En este artículo, se evalúan dos alternativas para integrar una BCAT en el proceso: una opción para generar vapor saturado a 4 bar(a) y otra para producir agua caliente a 90 °C.

Tabla 1. Especificaciones de partida.

<b>Necesidad de calor</b>	<b>Valor</b>
Temperatura (°C)	100-150
Fluido caloportador	Vapor saturado
Temperatura de impulsión (°C)	≈144 °C@4 bar(a)
Tecnología actual para producir el calor	Calderas mixtas (gas natural, biomasa, y biogás)
Demanda térmica promedio (MW)	≈20
Rendimiento de la tecnología actual (%)	88
Precio promedio de la fuente de energía (€/MWh)	44
Nº de horas anuales de operación (h/año)	8.000
<b>Disponibilidad de calor residual</b>	<b>Valor</b>
Temperatura (°C)	40-80
Fluido caloportador	Aire húmedo
Caudal promedio (toneladas/h)	72,6
Temperatura de impulsión (°C)	seca=68 °C, y húmeda=57 °C
Potencia térmica disponible (kW)	800-3.000
Nº de horas anuales de disponibilidad (h/año)	8.000

Los parámetros fijos empleados en el estudio técnico-económico están resumidos en la Tabla 2. El coste promedio de los combustibles es 0,044 €/kWh que incluye también el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el caso de usar las calderas. En el caso de la bomba de calor las emisiones de CO<sub>2</sub> de la electricidad consumida es 0,217 Kg-CO<sub>2</sub>/kWh basado del promedio en España [5].

Tabla 2. Parámetros del estudio técnico-económico.

Parámetro	Valor	Unidades
Coste de electricidad	100	€/MWh
Coste específico de la bomba de calor	700	€/kWt
Carga de refrigerante	300	kg
Potencial de calentamiento global (GWP)	2	-
Fugas anuales	10	%
Recuperación de refrigerante	95	%
Coste de mantenimiento con bomba de calor	2	%
Coste de mantenimiento con calderas	5,73	€/MWh
Emisiones de CO <sub>2</sub> de electricidad consumida	0,217	Kg-CO <sub>2</sub> /kWh
Coste de emisiones CO <sub>2</sub>	90,7	€/tonelada-CO <sub>2</sub>
Vida útil	20	años
Tasa de interés promedio	5	%
Tasa de inflación promedio	3	%

### 3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados más relevantes del estudio. En primer lugar, se analiza la situación actual con calderas mixtas (CMs). Dicho escenario ha servido de partida para analizar en un segundo lugar la viabilidad técnico-económica de integrar una BCAT en el proceso actual para producir vapor saturado a 4 bar(a) o agua caliente a 90 °C.

#### 3.1. Análisis del sistema actual con calderas mixtas.

Para satisfacer la demanda anual de calor de 157 GWh, se utilizan tres calderas mixtas que trabajan 8.000 horas/año para producir vapor saturado a 144 °C (4 bar(a)). La Tabla 3 muestra que estas calderas consumen anualmente 178 GWh con gastos de operación después un año de 8.760.000,0 €. Hay que tener en cuenta que el coste de emisiones de CO<sub>2</sub> está incluido en el coste anual total de energía.

Tabla 3. Balance de energía y balance económico de la situación actual con calderas mixtas.

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual	157	GWh/año
Consumo anual de energía	178	GWh/año
Coste anual del consumo de energía	7.860.000,0	€/año
Coste anual de mantenimiento	900.000,0	€/año
Gastos de operación año 1	8.760.000,0	€/año
Valor presente de los gastos de operación	139.851.503,8	€

### 3.2. Integración de bomba de calor de alta temperatura en el proceso actual

En este escenario, el BCAT funcionaría a plena carga durante 8.000 h/año. La capacidad del evaporador es constante e igual de 2,3 MW. Para evaluar la capacidad total de calefacción (CTC) máxima, se supuso un COP de 2,47 basado en el 45% del COP de Carnot, que es un valor típico de la literatura [3]. Para satisfacer el valor del COP, se utilizó la herramienta de “Microsoft Excel Solver” para obtener finalmente una CTC de 3,3 MW, suponiendo que las pérdidas de calor del ciclo son 25% del consumo total de energía eléctrica. La Tabla 4 muestra los resultados del estudio con y sin el impacto de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con la electricidad consumida por la BCAT. La BCAT podría satisfacer solo el 17% de la demanda total que corresponde a 26 GWh/año. Las CMs son responsables del resto de la demanda que corresponde a 131 GWh/año. Podemos ver también que el ahorro en el coste anual de la operación de la combinación de BCAT y CMs es 144.080,0 y 351.790,5 €/año con y sin el coste de emisiones de CO<sub>2</sub>, respectivamente.

Tabla 4. Análisis técnico-económico de la configuración de BCAT+CMs.

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual por BCAT	26	GWh
Electricidad consumida anual	10,6	GWh
SCOP de BCAT	2,45	-
Déficit (demanda de calor – producción de calor anual)	83	%
Coste de inversión de BCAT	2.282.014,7	€
Coste de operación anual de BCAT con emisiones CO <sub>2</sub>	1.309.242,4	€/año
Coste de operación anual de BCAT sin emisiones de CO <sub>2</sub>	1.101.531,8	€/año
Producción de calor anual por CMs	131	GWh
Energía consumida anual por CMs	149	GWh
Coste de operación anual de CMs con emisiones CO <sub>2</sub>	7.306.677,7	€
Ahorro en el coste de operación anual de BCAT+CMs con emisiones CO <sub>2</sub>	144.080,0	€/año
Ahorro en el coste de operación anual de BCAT+CMs sin emisiones CO <sub>2</sub>	351.790,5	€/año
Periodo de retorno simple con emisiones CO <sub>2</sub>	15,8	años
Periodo de retorno simple sin emisiones CO <sub>2</sub>	6,5	años

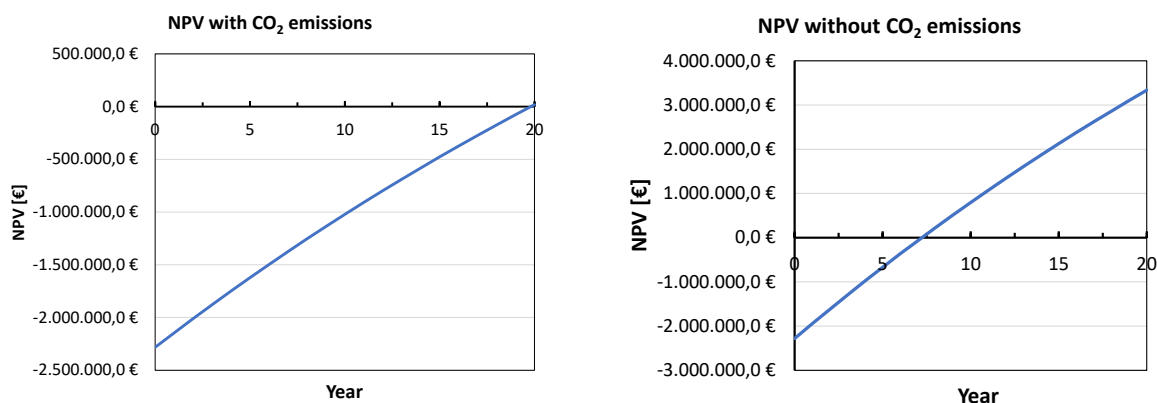


Figura 2. Valor actualizado neto de la configuración de BCAT+CMs.

Para tener en cuenta el factor del tiempo y su efecto en la inversión, la Figura 2 muestra el valor actualizado neto de la inversión durante 20 años. La inversión no es rentable teniendo en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> de la BCAT, pues el periodo de retorno es de casi 20 años con un retorno de la inversión de solo 5,1%. Sin embargo, HINOJOSA planea en el futuro usar electricidad verde procedente de fuentes de energía renovables. En este caso el periodo de retorno descontado disminuiría notablemente a 7,2 años con un retorno de la inversión de 17,3%.

### 3.3. Producción de agua caliente a 90 °C

En este escenario, la BCAT se utiliza para producir agua caliente a 90 °C recuperando calor a 68 °C. En estas condiciones la BCAT genera 15,6 GWh/año de calor consumiendo 2,1 GWh/año de electricidad, debido al alto COP de 7,4 (ver Tabla 5). Para satisfacer 100% de la demanda la BCAT tendría que trabajar 6.160 h/año (más bajo que el caso original por 1.840 h/año). Comparado con una CM con la misma capacidad calorífica, el uso de BCAT resulta en un ahorro en el coste de operación anual con y sin emisiones de CO<sub>2</sub> de 580.845,2 y 622.037,9 €/año, respectivamente. La Figura 3 muestra que los periodos del retorno descontado en ambos casos son muy parecidos, 3,3 y 3,0 años con y sin emisiones de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Esta opción es muy atractiva y muestra un potencial importante para sustituir la caldera por una BCAT ya que el periodo de recuperación de la inversión es muy corto < 5 años.

Tabla 5. Análisis técnico-económico de la BCAT para producir agua caliente a 90 °C.

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual por BCAT	15,6	GWh
Electricidad consumida anual por BCAT	2,1	GWh
SCOP de BCAT	7,4	-
Coste de inversión de BCAT	1.767.552,7	€
Coste de operación anual de BCAT con emisiones CO <sub>2</sub>	285.956,79	€/año
Coste de operación anual de BCAT sin emisiones CO <sub>2</sub>	244.764,1	€/año
Ahorro en el coste de operación anual con emisiones CO <sub>2</sub>	580.845,2	€/año
Ahorro en el coste de operación anual sin emisiones CO <sub>2</sub>	622.037,9	€/año
Periodo de retorno simple con emisiones CO <sub>2</sub>	3,0	años
Periodo de retorno simple sin emisiones CO <sub>2</sub>	2,8	años

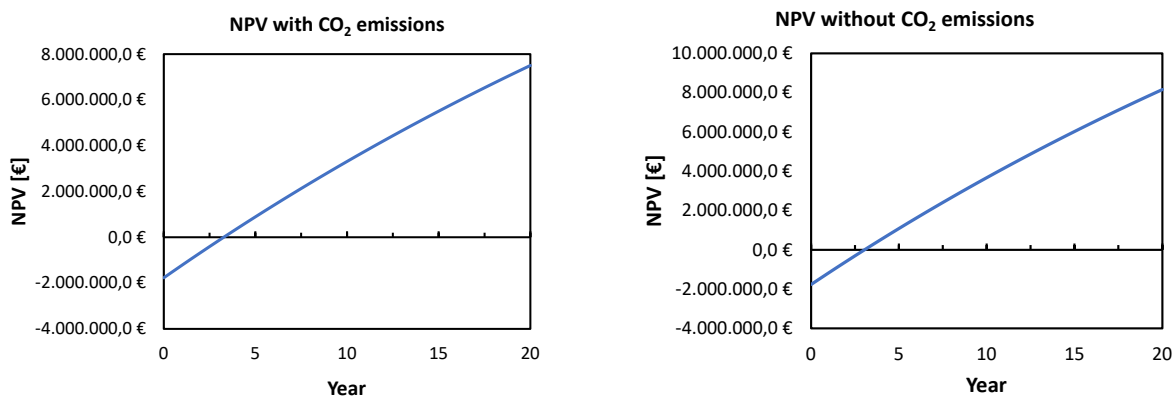


Figura 3. Valor actualizado neto de la BCAT para producir agua caliente a 90 °C.

## 4. CONCLUSIONES

El presente estudio se ha elaborado en el marco del proyecto europeo PUSH2HEAT, el cual contempla la integración en la industria de distintas tecnologías de recuperación de calor en la industria para la producción de calor en el rango de 90-160 °C. Se han analizado dos alternativas de la integración de una bomba de calor de alta temperatura en una industria papelera, una para generar vapor saturado a 4 bar (a) y otra para producir agua caliente a 90 °C. Los resultados más relevantes del estudio están resumidos como siguiente:

- La tecnología de BCAT es muy prometedora para reemplazar las calderas de combustibles si la temperatura de la fuente de calor es suficientemente alta (en este caso  $> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- La absorción es una tecnología alternativa para recuperar calor. Sin embargo, en este caso particular, haría falta una temperatura fuente de mínimo  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Además, desde el punto de vista hidráulico, la integración de esta tecnología en el proceso industrial es más complicada, comparado con una BCAT, ya que necesita disipar mucho calor al ambiente.
- La integración de BCAT en el proceso actual con una temperatura de fuente de  $68\text{ }^{\circ}\text{C}$  resulta en un periodo de retorno muy largo hasta 20 años debido al coste elevado de las emisiones de  $\text{CO}_2$  asociadas con el consumo eléctrico de la BCAT. Además, la BCAT no es capaz de cubrir toda la demanda de calefacción. Solo puede cubrir hasta  $\approx 17\%$  y el resto se cubre por las calderas.
- Sin embargo, el uso de la electricidad verde de las fuentes renovables resulta en un periodo de retorno razonable de 7,2 años con un retorno de la inversión de  $17,3\%$ .
- Otra alternativa sería producir agua caliente a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  recuperando calor residual a  $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta opción muestra resultados prometedores en comparación con la caldera. El uso de BCAT implica un ahorro en el coste de operación anual, teniendo en cuenta las emisiones de  $\text{CO}_2$ , de  $580.845,2\text{ €/año}$ , con un periodo de retorno descontado de 3,3 años, y con un retorno de la inversión de  $36\%$ .

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado a través del proyecto europeo PUSH2HEAT (Pushing forward the market potential of heat upgrading technologies), acuerdo nº 101069689 dentro de la Unión Europea, programa “Horizon 2020 research and innovation program”.

## REFERENCIAS

- [1] Heat Roadmap Europe. The transformation towards a low-carbon Heating & Cooling sector, 2017.
- [2] R. De Boer, A. Marina, B. Zühlsdorf, C. Arpagaus, M. Bantle, V. Wilk, B. Elmegaard, J. Corberán y J. Benson. Strengthening Industrial Heat Pump Innovation, Decarbonizing Industrial Heat, White Paper, 2020.
- [3] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann y S. Bertsch. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and applications, Energy, 2018, 152:985-1010.
- [4] PUSH2HEAT, <https://push2heat.eu/>, consultado el 2024.04.14.
- [5] OWID. Carbon intensity of electricity generation in Spain, <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=~ESP>, consultado el 2024.04.14.