

VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA

Abdelrahman H. Hassan¹, Jorge Payá^{1*}, Daniel Gómez-Elegido¹, Pablo Lucas-Alós²,
Víctor Sanjuan²

1: Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética,
Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España
e-mail: jorge.paya@iie.upv.es

2: ARYZTA Bakeries Iberia, Polígono Industrial El Globo
Ctra. Alcalá - Daganzo. M-118, Km 2.7, Daganzo 28814, España

Resumen: *El presente trabajo consiste en un estudio técnico-económico para analizar la aplicación potencial de distintas tecnologías de recuperación de calor en ARYZTA, de la industria agro-alimentaria. En concreto, se ha estudiado la posibilidad de producir vapor saturado a 150 °C mediante el uso de una bomba de calor de alta temperatura. De esta manera, se reduciría el consumo de las resistencias eléctricas actuales. El trabajo está enmarcado dentro del contexto del proyecto europeo PUSH2HEAT del programa H2020. Los resultados indican que la integración de una bomba de calor de alta temperatura reduciría las emisiones de CO₂ en un 61%, con un periodo de retorno inferior a un año. Por tanto, se trata de una alternativa a considerar en la planificación energética de la empresa dado su beneficio potencial y el impacto que puede tener para descarbonizar la industria.*

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

1. INTRODUCCIÓN

Dada la presión creciente para reducir el calentamiento global, las industrias tienen ante sí un reto importante. En concreto, la industria europea es responsable de un 21% de las emisiones de CO₂ [1]. Dos tercios de la demanda de energía en el sector industrial es para la producción de calor, y la mayoría de éste se produce actualmente con calderas, mediante combustión de combustibles fósiles. Por tanto, es necesario introducir nuevas alternativas para la producción de calor en la industria, si se quieren alcanzar los objetivos de neutralidad de carbono definidos para 2050 [2].

En concreto, para el rango de temperaturas de 120-150°C, en el que frecuentemente se envía vapor a procesos industriales, existen ya en el mercado ciertas alternativas como las bombas de calor de alta temperatura o las máquinas de absorción. Algunos autores como Kosmadakis et al. [3] o J. Payá et al. [4] han demostrado que se pueden obtener periodos de retorno inferiores a 3 años con bombas de calor de alta temperatura.

Las máquinas de absorción son otra alternativa real y viable técnicamente. Algunos estudios técnico-económicos han mostrado que se pueden alcanzar periodos de retornos bajos. Por ejemplo, Ma et al. [5] obtuvieron un periodo de retorno de dos años con una máquina de 5MW en la industria del caucho. También se han mencionado periodos de retorno del orden de 1.5 a 4 años con máquinas de absorción en China y Japón [6].

Pese a que hay estudios que muestran la viabilidad potencial de estas tecnologías, su integración en la industria es todavía escasa. La oferta de máquinas capaces de producir vapor en el rango 120-150°C es bastante reciente, la oferta de equipos es relativamente limitada, y hay todavía un potencial importante para reducir costes en caso de producción a gran escala. En todo caso, el ahorro potencial en emisiones de CO₂ es enorme, pues las bombas de calor pueden alcanzar rendimientos (COPs) de 2 a 5, y el COP eléctrico con sistemas de absorción puede ser del orden de 25. Estas en cambio requieren un mayor aporte de calor residual y también disipación de calor al ambiente.

Uno de los factores que limitan estas tecnologías de recuperación de calor son su elevado coste de inversión, que puede ser un orden de magnitud superior al coste con calderas. Es por tanto necesario realizar estudios técnico-económicos aplicados a los condicionantes de cada industria, con sus precios de energía y restricciones operativas, para fomentar una mayor penetración en el mercado, y con ello una reducción de las emisiones de CO₂. Dada la mayor penetración de las energías renovables en el mix energético español, y la electrificación progresiva de la industria, cabe pensar que estas tecnologías tengan un peso cada vez mayor. En un estudio reciente [7], se ha demostrado que hay un potencial de 23 GW de capacidad térmica a instalar con bombas de calor de alta temperatura, rango que podría ser cubierto en más de un 50% con capacidades inferiores a 10 MW.

A continuación, se presentan algunos resultados preliminares del proyecto europeo PUSH2HEAT [8], que tiene como objetivo la integración de tecnologías de recuperación de calor en la industria para producir calor a 90-160°C a partir de fuentes de calor residuales.

2. METODOLOGÍA

ARYZTA es un fabricante de panes y bollería. Se trata de una empresa internacional con una posición de liderazgo en el sector. ARZYTA presta servicios en el mercado minorista, restaurantes de servicio rápido y en otros servicios de la alimentación. La Tabla 1 resume el calor residual disponible, la demanda requerida (capacidad y nivel de temperatura) y la solución actual para satisfacer la demanda.

Se ha hallado una oportunidad potencial para recuperar calor de gases de combustión, que tienen una temperatura mínima de 110 °C y un caudal másico de 4,4 toneladas/h. Como se aprecia en la Tabla 1, ARYZTA utiliza actualmente resistencias eléctricas con una potencia total de 72 kW para generar vapor a 150 °C. La potencia útil promedio durante la semana es de 35 kW.

Tabla 1. Especificaciones de partida.

Necesidad de calor	Valor
Temperatura (°C)	Rango 100-150
Fluido caloportador	Agua-vapor
Temperatura de impulsión (°C)	150
Tecnología actual para producir el calor	Resistencia eléctrica
Demanda térmica promedio (kW)	35
Rendimiento actual (%)	90
Precio de la electricidad consumida (€/kWh)	0.106
Nº de horas anuales de operación	7 509
Nº de horas semanales	144
Disponibilidad de calor residual	
Temperatura (°C)	40-80
Fluido caloportador	Aire 1 atm abs
Caudal promedio (toneladas/h)	4.4
Temperatura de impulsión (°C)	Min 110°C
Potencia térmica disponible (kW)	22.4
Nº de horas anuales de disponibilidad	7 509
Nº de horas semanales de disponibilidad	144

La tabla 2 resume los parámetros empleados en el estudio técnico-económico. Cabe señalar que el coste específico de las resistencias eléctricas (120 €/kWt) no se ha empleado para tenerlas en cuenta como coste de inversión, pues están ya instaladas y en funcionamiento. Simplemente se ha tenido en cuenta a la hora de estimar los gastos de mantenimiento como un 2% del coste de adquisición de dichas resistencias eléctricas.

Tabla 2. Parámetros del estudio técnico-económico.

Parámetro	Valor	Unidades
Coste resistencias eléctricas	120	€/kWt
Coste bomba de calor	700	€/kWt
Carga de refrigerante	20	kg
Potencial de calentamiento global (GWP)	2	-
Fugas anuales	10	%
Recuperación de refrigerante	95	%
Coste sistema absorción	16 641	€/kWt
Coste de mantenimiento con bomba de calor y resistencia eléctrica	2	%
Coste de mantenimiento con sistema absorción	3	%
Emisiones de CO2 de electricidad consumida	0.217	kg CO2/kWhe
Coste emisiones CO2	94.2	€/tonelada CO2
Nº horas anuales de operación	7 509	h
Vida útil	20	años

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados más relevantes del estudio. En primer lugar, se analiza la situación actual con resistencias eléctricas. Dicho escenario ha servido de partida para analizar en un segundo lugar la viabilidad técnico-económica de integrar una bomba de calor de alta temperatura. Finalmente, en la sección 3.3, se comenta la posible integración de un sistema de absorción.

3.1. Coste y emisiones del sistema actual con resistencias eléctricas

Tal y como muestra la tabla 3, las resistencias eléctricas consumen anualmente 0.29 GWh de electricidad para generar 0.26 GWh de calor. Las emisiones de CO₂ no son nada despreciables (63.4 toneladas/año). En cuanto a los costes de operación anuales (36 892 €/año), la mayoría se deben al consumo de energía eléctrica (30 839 €/año). Este elevado coste es el que potencialmente se puede reducir mediante las dos alternativas planteadas en las secciones 3.2. y 3.3.

Tabla 3. Balance de energía y balance económico de la situación actual con resistencias eléctricas

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual	0.26	GWh
Consumo anual de energía	0.29	GWh
Emisiones de CO ₂ anuales	63.4	Toneladas CO ₂
Coste anual del consumo de energía	30 839	€/año
Coste anual de mantenimiento	84	€/año
Coste anual de las emisiones de CO ₂	5 969	€/año
Gastos de operación año 1	36 892	€/año

3.2. Coste y emisiones con bomba de calor de alta temperatura

En base al calor residual disponible (datos resumidos en la Tabla 1), y suponiendo que el evaporador de la bomba de calor tiene una efectividad del 60% con una temperatura de los gases de combustión de 80 °C, la capacidad de enfriamiento del HTHP sería de 22.4 kW. El COP estimado es de 4,8, y se corresponde con un 45% del COP de Carnot, un valor bastante habitual para un aumento de temperatura de 40 K. La Tabla 4 resume el estudio técnico-económico para la bomba de calor. Se puede observar que, aprovechando el calor residual disponible, existe un déficit del 24% que debería ser producido por las resistencias eléctricas actuales. La Figura 1 muestra el Valor Actualizado Neto correspondiente a la integración de la bomba de calor. Se puede apreciar cómo el coste de inversión se recupera muy rápidamente, pues el periodo de retorno es inferior a un año. Dicha cifra es comprensible dado que el rendimiento del sistema actual se multiplicaría prácticamente por 5, y que el coste del consumo eléctrico es la mayoría del coste anual de operación. Los resultados son muy prometedores tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista del ahorro de emisiones de CO₂, que sería de $63.4 - 24.4 = 39$ toneladas/año (ahorro del 61%).

Tabla 4. Análisis técnico-económico con bomba de calor de alta temperatura.

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual	0.26	GWh
Déficit (demanda de calor – producción de calor anual)	24	%
Consumo anual de energía eléctrica	0.11	GWh
Emisiones de CO ₂ anuales	24.40	ton-CO ₂
Coste anual del consumo de energía	11846	€
Coste anual del mantenimiento	456	€
Coste anual de las emisiones de CO ₂	24	€
Coste de operación anual	12 327 €	€
Coste de inversión	18 607	€
Periodo de retorno simple	0.76	años

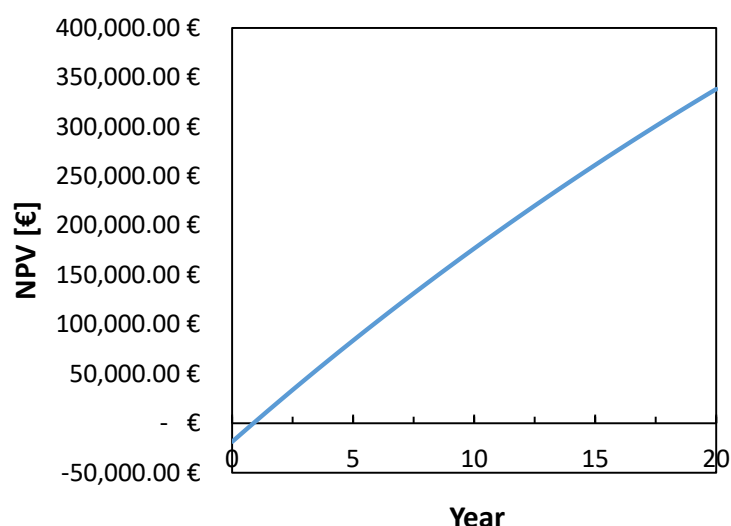


Figura 1. Valor Actualizado Neto de la integración de una bomba de calor de alta temperatura.

3.3. Coste y emisiones con sistema de absorción

La tabla 5 muestra los resultados técnico-económicos más relevantes de la integración de una máquina de absorción. Aunque desde el punto de vista económico el periodo de retorno es admisible (2.34 años), cabe señalar que un 69% de la demanda de calor se produciría con las resistencias eléctricas. Esto es debido a que la máquina de absorción requiere más calor residual que con bomba de calor. Dado que la mayoría del calor lo producen las resistencias eléctricas, las emisiones de CO₂ seguirían siendo elevadas (44 toneladas/año frente a 63 toneladas/año en el caso con 100% resistencias eléctricas, es decir un ahorro del 30%). Por tanto, y aunque este escenario pueda resultar rentable económicamente, se considera más interesante el escenario con bomba de calor, pues el periodo de retorno es más bajo y el ahorro en emisiones de CO₂ es también superior. Además, desde el punto de vista hidráulico la integración de la bomba de calor es también más sencilla pues no requiere disipación de calor al ambiente.

Tabla 5. Análisis técnico-económico con máquina de absorción.

Parámetro	Valor	Unidades
Producción de calor anual	0.26	GWh
Déficit (demanda de calor – producción de calor anual)	69	%
Consumo anual de energía eléctrica	0.20	GWh
Emisiones de CO ₂ anuales	44	Toneladas CO ₂
Coste anual del consumo de energía	677	€
Coste anual del mantenimiento	21 616	€
Coste anual de las emisiones de CO ₂	611	€
Coste de operación anual	22 391	€
Coste de inversión	33 896	€
Periodo de retorno simple	2.34	años

4. CONCLUSIONES

El presente análisis se ha realizado 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. Las dos tecnologías que se han analizado son una bomba de calor de alta temperatura, y una máquina de absorción. A continuación, se resumen los resultados más relevantes del estudio:

- La integración de una bomba de calor de alta temperatura es altamente beneficiosa, tanto desde el punto de vista económico como medio ambiental. El rendimiento del sistema actual con resistencias eléctricas se multiplicaría prácticamente por 5, lo cual supondría no solo un importante aumento del rendimiento, sino también una reducción significativa de las emisiones de CO₂ anuales, que se reducirían en un 61%. La bomba de calor podría suministrar un calor anual de 0,2 GWh y un 24% de la demanda debería producirse con las resistencias eléctricas actuales. Esto se debe a que el calor residual no es suficiente para producir el 100% de la demanda de calor. El COP de la bomba de calor sería especialmente bueno (4.8) dada la elevada temperatura de los gases de escape con los que se alimentaría al evaporador.
- La integración de una máquina de absorción, aunque pueda resultar viable económicamente (periodo de retorno de 2.34 años), se considera menos interesante en este caso particular, ya que, con el calor residual disponible, la producción de calor por absorción sería baja. Un 69% de la demanda de calor debería seguir siendo producido por las resistencias eléctricas, por lo que el ahorro en emisiones de CO₂ sería solo del 30%. De haber más calor residual, el ahorro tanto económico como en emisiones de CO₂ podría resultar superior al obtenido con la bomba de calor.

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] de Boer R., Marina A., Zühlsdorf B., Arpagaus C., Bantle M., Wilk V., Elmegaard B., Corberan JM, Benson J. Strengthening Industrial Heat Pump Innovation, Decarbonizing Industrial Heat, 2020.
- [2] European Commission European Green Deal Long Term Strategy 2050, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_es, consultado el 2024.02.17.
- [3] Kosmadakis G., Arpagaus C., Neofytou C., Bertsch S. Techno-Economic Analysis of High-Temperature Heat Pumps with Low-Global Warming Potential Refrigerants for Upgrading Waste Heat up to 150 °C, *Energy Convers Manag*, 2020, 226: 113488.
- [4] Payá J., Cazorla-Marín A., Arpagaus C., Corrales-Ciganda JL, Hassan, AH. Low-Pressure Steam Generation with Concentrating Solar Energy and Different Heat Upgrade Technologies: Potential in the European Industry, *Sustainability*, 2024, 5 (16)
- [5] Ma X., Chen J., Li S., Sha Q., Liang A., Li W., Zhang J., Zheng G., Feng Z. Application of Absorption Heat Transformer to Recover Waste Heat from a Synthetic Rubber Plant, *Appl. Therm. Eng*, 2003, 23, 797–806.
- [6] Cudok F., Giannetti N., Corrales-Ciganda JL, Aoyama J., Babu P., Coronas A., Fujii T., Inoue N., Saito K., Yamaguchi S. et al. Absorption Heat Transformer—State-of-the-Art of Industrial Applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021, 141, 110757.
- [7] Marina A. et al., An estimation of the European industrial heat pump market potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139 110545.
- [8] PUSH2HEAT european project, grant agreement No. 101069689 of the European Union’s Horizon 2020 research and innovation program, <https://push2heat.eu/>, consultado el 2024.04.11.