



APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL MEDIANTE TECNOLOGÍA DE BOMBA DE CALOR.

CASO DE USO EN PLANTA DE PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Jorge Payá Herrero¹, Abdelrahman H. Hassan², José Ramón Albert García³,

¹ Instituto de Ingeniería Energética (IIE), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, jorge.paya@iie.upv.es

² Instituto de Ingeniería Energética (IIE), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, ahassan@iie.upv.es

³ Pavasal Empresa Constructora, S.A., Valencia, España, jralbert@pavasal.com

Resumen

El planeta se encamina cada vez más rápidamente hacia una economía neutra en carbono, por lo que cualquier solución que minimice la emisión de gases de efecto invernadero (GEIs) es un paso más hacia ese objetivo. Es por ello que las industrias estamos cada vez más implicadas en este cambio, bien por concienciación medioambiental, bien por necesidad económica.

En las industrias manufactureras, existen numerosos procesos que consumen energía, que parte de la misma se desaprovecha en forma de calor, no siendo la industria de producción de asfalto una excepción. Esta energía proviene en su gran mayoría de combustibles fósiles, convirtiéndose en focos de contaminación importantes, por lo que es necesario implementar una reutilización de dicha energía en los propios procesos productivos con el fin de reducir el consumo de dichos combustibles fósiles hasta la llegada de fuentes medioambientalmente más sostenibles.

Durante el proceso de producción de mezclas asfálticas en caliente (HMA) y semicaliente (WMA), se produce un proceso de calentamiento de los áridos, resultando un exceso de calor residual que es eliminado a través de las chimeneas. Este calor es posible emplearlo en otros procesos diferentes al calentamiento de áridos, que también necesitan de combustibles fósiles para elevar la temperatura, reduciendo así el consumo de combustible fósil empleado.

Actualmente, existen proyectos de investigación financiados por Europa que pretenden maximizar esta recuperación de calor mediante el empleo de bombas de calor de alta eficiencia, siendo uno de ellos el proyecto PUSH2HEAT, donde participa como socio la Universidad Politécnica de Valencia y donde Pavasal ha participado en la generación de un caso de uso de la tecnología desarrollada aplicada a mezclas asfálticas.

En el presente caso de estudio teórico se plantea una solución económicamente viable que pretende la recuperación de calor residual mediante el uso de una tecnologías de recuperación calor de alta eficiencia para su reutilización en el proceso de producción de las mezclas. El objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de producción de mezclas asfálticas, con el fin de minimizar el impacto asociado de dichas emisiones, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico a medio plazo, bajo la suposición de una legislación sobre emisiones cada vez más restrictiva.

Palabras clave: Recuperación calor, reducción emisiones, medioambientalmente sostenible

1 Introducción

Hacer de Europa la primera economía circular, climáticamente neutral y sostenible digitalmente para 2050, requiere una profunda transformación de sus sistemas de movilidad, energía, construcción y producción [1]. La industria es uno de los mayores consumidores de energía (28%) y contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (30%) [2] a nivel mundial. La transición energética necesaria de los combustibles fósiles a energías renovables neutras en carbono es una gran oportunidad para la industria europea para crear crecimiento inclusivo y empleo en los Estados miembros y países asociados, reducir los costos para los consumidores, disminuir la dependencia de importaciones de la UE y redirigir las inversiones hacia una infraestructura inteligente y sostenible. A nivel global, como se puede observar en la Figura 1, el 74% de la demanda de energía industrial se destina al calor de proceso, con el 52% de esa energía requerida a niveles bajos y medios de temperatura [3]. La demanda de calor global total se estima que aumentará de aproximadamente 50,000 TWh_{th} en 2020 a 56,600 TWh_{th} para 2050, siendo su principal impulsor el calor de proceso industrial [4]. La combinación de empleo de energías renovables con bombas de calor eléctricas de alta eficiencia (HP) para mejorar el exceso de calor será una solución fundamental para la transición industrial de calor hacia la descarbonización.

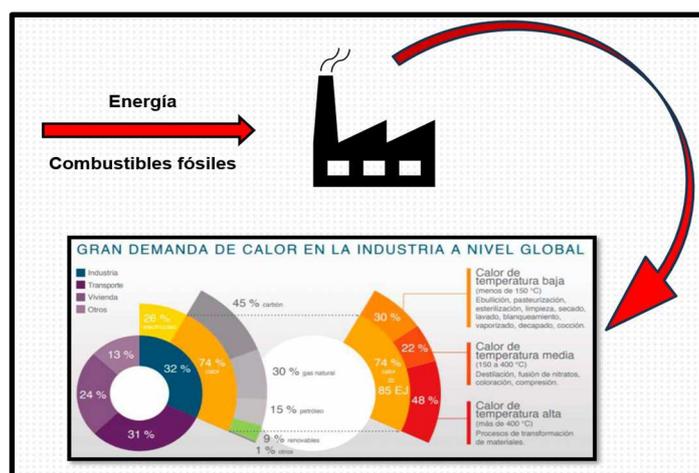


Figura 1. Demanda de calor en la industria a nivel global.

En consecuencia, el empleo de tecnologías de alta eficiencia para mejorar la recuperación de calor residual será una solución para la transición industrial hacia la descarbonización. Sin embargo, el estado actual de la tecnología, principalmente las bombas de calor convencionales, no satisface actualmente las necesidades de la industria. Las bombas de calor comercialmente disponibles no pueden suministrar procesos con calor de hasta 160°C y/o son de pequeño tamaño y potencia, no han sido suficientemente probadas y demostradas en entornos operativos ampliados debido al desafío complejo de adaptarlas a la estructura específica de demanda de calor de cada industria (por ejemplo, ratios de carga base variables y estacionalidad de la demanda de calor) y los correspondientes costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX) no las hacen lo suficientemente atractivas. Además, su acoplamiento en sistemas híbridos altamente eficientes con fuentes de calor renovables, como el calor solar térmico y el exceso de calor industrial, no ha sido suficientemente investigado a escala industrial y carece de herramientas de optimización holística tanto para el diseño como para la operación, con el fin de abordar la necesidad de un sistema flexible que garantice el suministro de energía de la industria. Además, los modelos de negocio innovadores para la comercialización y financiación de bombas de calor eléctricas de alta eficiencia en combinación con energías renovables y exceso de calor están todavía en una etapa

inicial de desarrollo, mientras que las barreras legales, regulatorias y socioeconómicas para abordar las barreras de aceptación son importantes. Por lo tanto, es necesario idear nuevos acuerdos contractuales entre proveedores de tecnología, fabricantes y financiadores, pero también con otros actores involucrados (por ejemplo, dentro de las plantas industriales, con otras plantas vecinas o redes de calefacción), teniendo en cuenta el enfoque de nuevos centros para la circularidad y proponer medidas eficientes para superar posibles barreras regulatorias, técnicas, económicas, financieras y de riesgo.

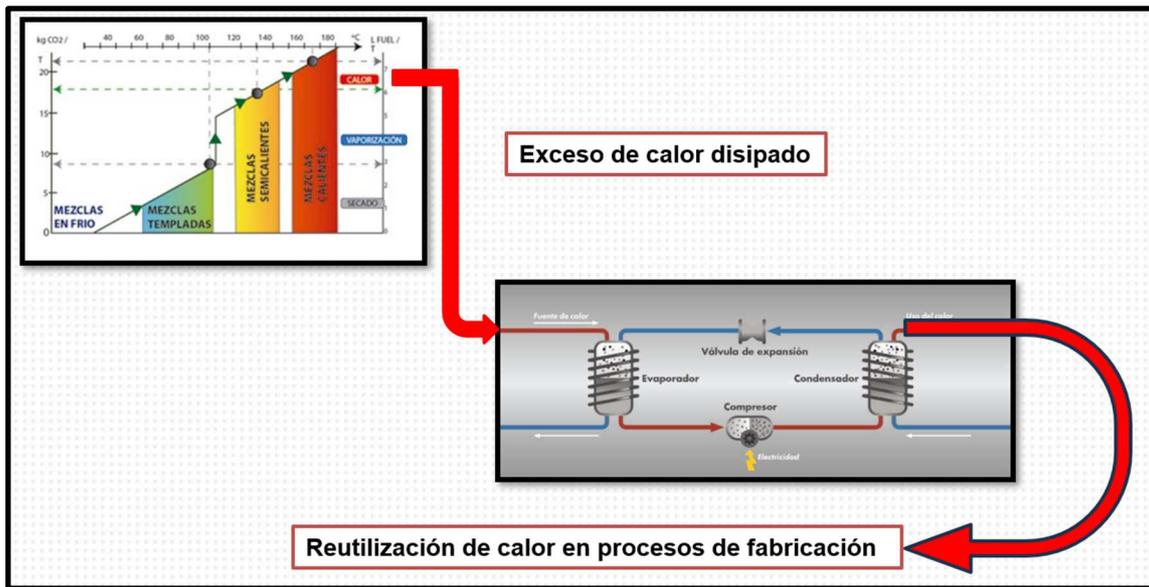


Figura 2. Reutilización de calor en la producción de mezclas asfálticas

Para ayudar a acoplar este tipo de tecnologías, actualmente existen proyectos de investigación financiados por Europa que pretenden maximizar esta recuperación de calor mediante el empleo de bombas de calor de alta eficiencia, incrementando el valor del coeficiente de operatividad o coeficiente de rendimiento (COP) de una bomba de calor siendo está la razón entre el calentamiento o enfriamiento proporcionado y la electricidad consumida, ya que coeficiente mayores equivalen a menores costes operativos. [5]

2 Proyecto PUSH2HEAT

Con este objetivo, nace el proyecto PUSH2HEAT. Éste es un proyecto financiado por la Unión Europea a través del programa Horizonte Europa y que tiene como objetivo abordar las barreras técnicas, económicas y regulatorias que impiden que las tecnologías de mejora del calor de las bombas de calor se desplieguen ampliamente.

Entre sus objetivos se encuentran:

1. Desarrollo a escala completa de tecnologías de mejora de calor para asegurar una integración optimizada en los procesos industriales.
2. Demostración de sistemas de mejora de calor industriales a escala completa.
3. Desarrollo de hojas de ruta de explotación exitosas, modelos de negocio y acuerdos contractuales para la implementación de tecnologías de mejora de calor.
4. Evaluación del impacto ambiental y económico.
5. Difusión del trabajo de PUSH2HEAT y resultados críticos.

Push2Heat



Figura 3. Consorcio proyecto PUSH2HEAT

Para lograr los objetivos, lo hace escalando cuatro tecnologías diferentes de mejora de recuperación de calor (cuyas temperaturas de suministro van desde 90 °C hasta 160 °C) para optimizar su eficiencia y rendimiento económico, centrandose en integrarlas en los sectores industriales relevantes. Las tecnologías y los sectores son:

1. Mejora del calor residual del proceso mediante una bomba de calor de compresión de vapor con compresores de pistón en la industria papelera.
2. Mejora del calor residual de calor y energía combinados (CHP) mediante una bomba de calor de compresión de vapor con compresores turbo en la industria papelera.
3. Mejora del calor residual del proceso y CHP mediante una bomba de calor de absorción en una planta química.
4. Monitorización a largo plazo de una bomba de calor termoquímica en un sitio de demostración industrial ya existente, con pruebas adicionales en la industria química.

En este proyecto, participa como socio la Universidad Politécnica de Valencia, a través del Instituto de Ingeniería Energética, que contactó con Pavasal con el fin de extrapolar los resultados obtenidos en el proyecto a través de la generación de un nuevo caso de uso, debido a la ideal casuística que tiene la empresa al ser productora de mezclas asfálticas y por lo tanto, consumidora de energía y con exceso de calor residual en el proceso productivo.

3 Objetivos

En el presente caso de estudio teórico, se plantea soluciones económica y medioambientalmente viables que pretenden la recuperación de calor residual mediante el uso de técnicas de recuperación de calor de alta eficiencia para su reutilización en el proceso de producción de las mezclas.

El objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de producción de mezclas asfálticas, con el fin de minimizar el impacto asociado de dichas emisiones, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico a medio plazo, bajo la suposición de una legislación sobre emisiones cada vez más restrictiva asociada al camino que pretende seguir la Unión Europea.

4 Datos para la evaluación

Pavasal suministró los datos que alimentarían al sistema de evaluación, incluidos en la Figura 4, donde se analizaba el consumo energético para producir una tonelada de asfalto. Las cantidades

positivas indican calor generado o calor disponible no utilizado, y los negativos indican consumo de calor.

Proceso	Parámetro	Valor	Unidad
Quemador	m_{gas}	4,55	Kg/ton _{asf}
	η	95	%
	CPI_{gas}	55080	KJ/Kg _{gas}
	Energía	66,13	kWh
Caletanr filler	m	35	Kg/ton _{asf}
	C_p	1,1	KJ/Kg.K
	ΔT	140	K
	Energía	-1,5	kWh
Calentar áridos	m	781,9	Kg/ton _{asph}
	C_p	1,1	KJ/Kg.K
	ΔT	140	K
	Energía	-33,45	kWh
Evaporación humedad	m	41,2	kg
	ΔT	140	K
	Energía	-3,58	kWh
	$h_{fg}@1\text{ atm}$	2257	KJ/Kg
	Energía latente	-25,8	kWh
	Energía total	-29,38	kWh
Gases	T_{avg}	106	C
	m_{med}	37	ton/h
	Perdidas calor	10	%
	Energía	1,63	kWh
Caldera betún	m_{gas}	0,18	Kg/ton _{asf}
	η	85	%
	CPI_{gas}	55080	KJ/Kg _{gas}
	Energía	2,34	kWh
Calentar betún	m	42	Kg/ton _{asph}
	C_p	0,9	KJ/Kg.K
	ΔT	140	K
	Energía	-1,5	kWh
Gases caldera	T_{avg}	227	C
	m_{med}	2	ton/h
	Perdidas calor	10	%
	Energía	0,76	kWh

Figura 4. Datos de producción de una tonelada de asfalto

Los resultados obtenidos del proceso de Pavasal indicaba que el calor recuperado por los gases emitidos en la producción de asfalto, con las tecnologías actuales de recuperación de calor, no es capaz de proporcionar el calor necesario para calentar uno de los componentes en la producción de mezclas asfálticas, el betún necesario en la producción anual, por lo que es necesario emplear tecnologías adicionales con el fin de obtener un proceso viable tanto económica como medioambientalmente y por ello, se evaluaron 4 tipo de tecnologías:

- Bomba de calor (High Temperature Heat Pump o HTHP) con caldera (Gas Boiler o GB)
- Bomba de calor con tubos de vacío (Solar Vacuum Tubes o SVT)
- Transformador de calor por absorción (Adsorption Heat Transformer o AHT) con caldera
- Transformador de calor por absorción con tubos de vacío

Donde la fuente de calor para los elementos de recuperación de calor serían una combinación de recuperación de calor excedente de los gases emitidos, así como calor solar concentrado a través de tubos de vacío o una caldera, con el fin de proporcionar una fuente de calor estable para la bomba de calor.

En la Figura 5 se muestra los principales parámetros fijos utilizados para el análisis técnico-económico en este estudio, como son los costes CAPEX de los elementos a evaluar, horas de trabajo, datos de eficiencia, e incluso, el coste de las emisiones de CO₂ a precio actual (octubre 2023), aunque sabemos que este coste se incrementará, viendo la tendencia de los datos.

Hemos supuesto el estudio económico tanto contabilizando el pago por emisiones como sin él.

Parámetro	Valor	Unidad
Coste específico de la caldera	70	€/kWt
Eficiencia caldera	85	%
CAPEX Bomba calor	700	€/kWt
Refrigerante bomba calor	100	kg
GWP	2	-
Fugas anuales	10	%
Factor recuperación refrigerante	95	%
CAPEX AHT	960	€/kWt
CAPEX tubos vacío	1500	€/m ²
Costes mantenimiento GB, HTHP y SVT**	2	%
Coste mantenimiento AHT**	3	%
Emisiones CO2 de la electricidad ₁	0,217	kg-CO2/kWhe
Emisiones CO2 gas	0,234	kg-CO2/kWht
Coste de emisiones de CO2*	87,9	€/ton-CO2
Horas de trabajo anuales plantas*	2200	h
Amortización	20	yr
Tasa de interés	5	%
Tasa inflación***	3	%

Figura 5. Principales parámetros fijos utilizados para el análisis técnico-económico

5 Resultados económicos y medioambientales

5.1 Bomba de calor con caldera (HTHP+GB)

En este escenario (HTHP+GB), se evalúa la integración del HTHP en el proceso. Cualquier déficit en producción de calor es cubierto por la caldera de gas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6, que resume el análisis técnico-económico para este escenario después del primer año de funcionamiento y dentro de la vida útil de la inversión (20 años).

Tecnología	Parámetro	Valor	Udidad
HTHP	Producción de calor anual	0,53	TWh
	Déficit de calor	47,3	%
	Consumo de energía anual	0,18	TWh
	Emisión CO ₂ anual	39,2	ton-CO ₂
	Coste energía anual	41,533.3	€
	Coste de mantenimiento anual	3,383.8	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	3,446.2	€
	CAPEX	169,188.2	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	48,363.3	€
OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	44,917.1	€	
GB	Producción de calor anual	0,48	TWh
	Consumo de energía anual	0,56	TWh
	Emisión CO ₂ anual	132	ton-CO ₂
	Coste energía anual	39,370.1	€
	Coste de mantenimiento anual	304	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	11,568.4	€
	CAPEX	0	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	51,242.5	€
	OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	39,674.1	€
HTPT+GB	Total OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	99,605.8	€
	Total OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	84,591.4	€
	Total CAPEX	169,188.2	€
	OPEX ahorrado con emisiones primer año	8,632.1	€
	OPEX ahorrado sin emisiones primer año	—**	€
	SPP con emisiones	19,6	año
	SPP sin emisiones	—**	año
	DPP con emisiones	—**	año
	ROI con emisiones	—**	%
	LCOH con emisiones	0,13	€/kWh
	DPP sin emisiones	—**	año
	ROI sin emisiones	—**	%
	LCOH sin emisiones	0,11	€/kWh

Figura 6. Datos técnico económicos de la solución HTPT+GB

Estos resultados demuestran que el HTHP no es capaz de cubrir el total de calor requerido, existiendo un déficit de $\approx 47,3\%$, el cual es cubierto por la caldera de gas. El escenario HTHP+GB tiene un periodo de retorno que alcanza los 19,60 años. Como se puede observar en la Figura 7, todos los valores son negativos, tanto contabilizando el pago por emisiones como sin contabilizarlas, lo que indica la no rentabilidad del escenario HTHP+GB según los supuestos actuales.

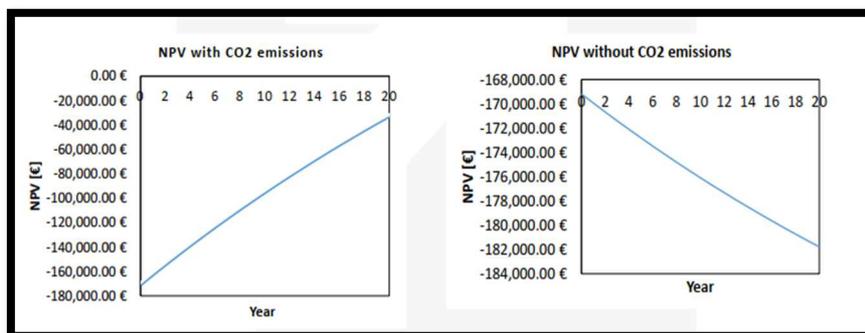


Figura 7. Retorno de la inversión de la solución HTPT+GB

5.2 Bomba de calor con tubos de vacío (HTHP+SVT)

En este escenario (HTHP+SVT), se evalúa la integración de HTHP en el proceso, y cualquier déficit en la producción de calor será cubierta por la tecnología de tubos de vacío (SVT). Como se mencionaba en el escenario anterior, el déficit de calor es $\approx 47,3\%$. En base a esto y considerando la media de irradiación solar al día en la zona de evaluación, para cubrir el resto de la demanda de calor se requeriría una superficie de 529 m^2 . Sin embargo, hay que tener en cuenta que el principal factor que puede afectar a la rentabilidad de esta configuración es el alto CAPEX específico (que incluye el equipamiento y costes de instalación) del sistema SVT, que podrían alcanzar los 1.500 €/m^2 . Los datos del análisis se muestran en la Figura 8.

Tecnología	Parámetro	Valor	Udidad
HTHP	Producción de calor anual	0,53	TWh
	Déficit de calor	47,3	%
	Consumo de energía anual	0,18	TWh
	Emisión CO ₂ anual	39,2	ton-CO ₂
	Coste energía anual	41,533,3	€
	Coste de mantenimiento anual	3,383,8	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	3,446,2	€
	CAPEX	169,188,2	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	48,363,3	€
OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	44,917,1	€	
SVT	Producción de calor anual	0,48	TWh
	Consumo de energía anual	0	TWh
	Emisión CO ₂ anual	0	ton-CO ₂
	Coste energía anual	0	€
	Coste de mantenimiento anual	15,858,1	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	0	€
	CAPEX	792,906,3	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	15,858,1	€
	OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	15,858,1	€
HTPT+SVT	Total OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	64,221,4	€
	Total OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	60,775,2	€
	Total CAPEX	962,094,5	€
	OPEX ahorrado con emisiones primer año	44,016,7	€
	OPEX ahorrado sin emisiones primer año	19,581,2	€
	SPP con emisiones	21,9	año
	SPP sin emisiones	49,1	año
	DPP con emisiones	—**	año
	ROI con emisiones	—**	%
	LCOH con emisiones	0,15	€/kWh
	DPP sin emisiones	—**	año
	ROI sin emisiones	—**	%
	LCOH sin emisiones	0,14	€/kWh

Figura 8. Datos técnico económicos de la solución HTPT+SVT

Si observamos los retorno de la inversión en la Figura 9, al ser una tecnología mucho más cara que el empleo de la caldera, los retornos de inversión serían de 21,9 años si se incluye el coste de las emisiones de CO₂ y de 49,1 años si no se incluye; es decir, significa que no hay rentabilidad dentro de la vida útil determinada de la inversión.

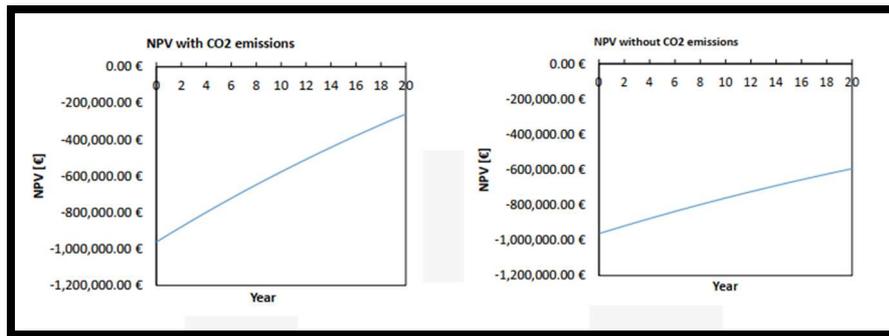


Figura 9: Retorno de la inversión de la solución HTPT+SVT

5.3 Transformador de calor por absorción con caldera (AHT+GB)

En este escenario, el HTHP eléctrico convencional se reemplaza por un transformador de calor por absorción (AHT). Esta tecnología reemplaza al compresor mecánico con uno térmico. El principio fundamental de funcionamiento de AHT es que algunas sustancias tienen la tendencia a absorber otras sustancias, como es el caso de la absorción de vapor de agua por una solución de bromuro de litio, absorbiendo energía. Este sistema es más complejo en cuanto a su instalación y operación y necesita más calor residual para funcionar de manera eficiente en comparación con el HTHP convencional.

Esta complejidad se refleja en incrementar el costo de mantenimiento al 3% en lugar del 2% en el caso de HTHP, GB y SVT, sin embargo, el consumo eléctrico del AHT es muy bajo comparado con el HTHP empleado principalmente para accionar las bombas de circulación, por lo que el COP relativo al consumo eléctrico es muy alto, en el rango de 30. Por el contrario, el AHT necesita una gran cantidad de calor residual para satisfacer la demanda de calor, por lo que, según el incremento de temperatura dado entre la fuente y el disipador, el COP en relación con la capacidad térmica de la fuente debe estar en el rango de 0,49, obteniendo un déficit de calor del 83% respecto a la bomba de calor convencional. Como en el caso de HTHP+GB, el déficit de demanda de calor se cubre con un GB. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 10.

Tecnología	Parámetro	Valor	Unidad
AHT	Producción de calor anual	0,17	TWh
	Déficit de calor	83	%
	Consumo de energía anual	0,0057	TWh
	Emisión CO ₂ anual	1,24	ton-CO ₂
	Coste energía anual	1,319.0	€
	Coste de mantenimiento anual	2,251.3	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	109,4	€
	CAPEX	75,042.8	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	3,679.7	€
OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	3,570.5	€	
GB	Producción de calor anual	0,84	TWh
	Consumo de energía anual	0,99	TWh
	Emisión CO ₂ anual	230,6	ton-CO ₂
	Coste energía anual	68,989.9	€
	Coste de mantenimiento anual	533,1	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	20,271.8	€
	CAPEX	0	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	89,794.8	€
	OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	69,523.0	€
AHT+GB	Total OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	93,474.5	€
	Total OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	73,093.5	€
	Total CAPEX	75,042.8	€
	OPEX ahorrado con emisiones primer año	14,763.5	€
	OPEX ahorrado sin emisiones primer año	10,709.2	€
	SPP con emisiones	5,1	año
	SPP sin emisiones	7	año
	DPP con emisiones	5,6	año
	ROI con emisiones	16,2	%
	LCOH con emisiones	0,12	€/kWh
	DPP sin emisiones	7,9	año
	ROI sin emisiones	16	%
	LCOH sin emisiones	0,09	€/kWh

Figura 10. Datos técnico económicos de la solución AHT+GB

Si observamos los retorno de la inversión, la configuración AHT+GB tiene un retorno de 5,1 años, teniendo en cuenta el coste de las emisiones de CO₂, y de 7,0 años si este costo se desprecia, por lo que esta tecnología si es rentable económicamente en un plazo de tiempo aceptable, incluso si se desprecia el pago por emisiones de un futuro próximo, como se puede observar en la Figura 11.

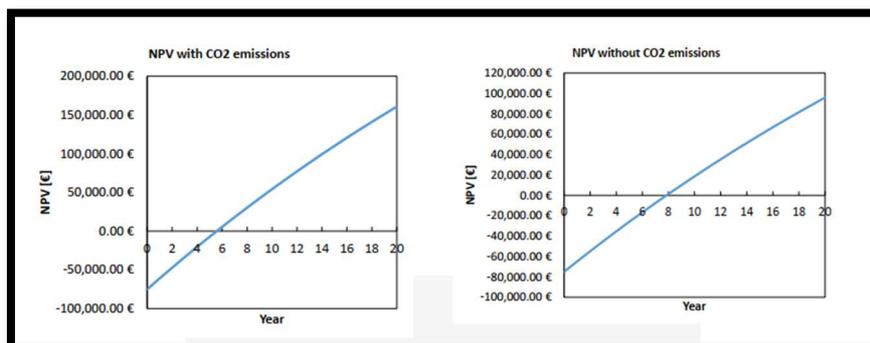


Figura 11. Retorno de la inversión de la solución AHT+GB

5.4 Transformador de calor por absorción con tubos de vacío (AHT+SVT)

Como último estudio, se evalúa el uso de tubos de vacío con el uso de AHT. En esta configuración, se utiliza el SVT en lugar del GB para cubrir el déficit del 83% en la demanda de calor. Según la irradiación solar diaria en la zona de estudio, la superficie requerida de tubos de vacío debería ser

de 926 m², lo que es un 75 % más que la superficie requerida de los tubos de vacío utilizados en la configuración HTHP+SVT. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12.

Tecnología	Parámetro	Valor	Udidad
AHT	Producción de calor anual	0,17	TWh
	Déficit de calor	83	%
	Consumo de energía anual	0,0057	TWh
	Emisión CO ₂ anual	1,24	ton-CO ₂
	Coste energía anual	1,319.0	€
	Coste de mantenimiento anual	2,251.3	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	109,4	€
	CAPEX	75,042.8	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	3,679.7	€
	OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	3,570.5	€
SVT	Producción de calor anual	0,84	TWh
	Consumo de energía anual	0	TWh
	Emisión CO ₂ anual	0	ton-CO ₂
	Coste energía anual	0	€
	Coste de mantenimiento anual	27,788.9	€
	Coste emisiones CO ₂ anual	0	€
	CAPEX	1,389,444.7	€
	OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	27,788.9	€
	OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año	27,788.9	€
	AHT+SVT	Total OPEX con emisiones de CO ₂ después de primer año	31,468.6
Total OPEX sin emisiones de CO ₂ después del primer año		31,359.4	€
Total CAPEX		1,464,487.5	€
OPEX ahorrado con emisiones primer año		76,769.5	€
OPEX ahorrado sin emisiones primer año		52,443.2	€
SPP con emisiones		19,1	año
SPP sin emisiones		28	año
DPP con emisiones		—**	año
ROI con emisiones		—**	%
LCOH con emisiones		0,14	€/kWh
DPP sin emisiones		—**	año
ROI sin emisiones		—**	%
LCOH sin emisiones		0,14	€/kWh

Figura 12. Datos técnico económicos de la solución AHT+SVT

Si observamos los retorno de la inversión mostrados en la Figura 13, al ser una tecnología mucho más cara que el empleo de la caldera y como en el caso estudiado con el HTPT, los retornos de inversión serían de 19,1 años si se incluye el coste de las emisiones de CO₂ y de 28 años si no se incluye; es decir, significa que no hay rentabilidad dentro de la vida útil determinada de la inversión.

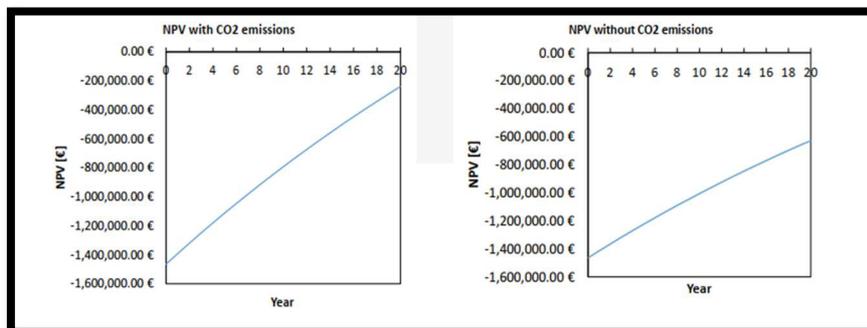


Figura 13: Retorno de la inversión de la solución AHT+SVT

Sin embargo, es la solución medioambiental más viable, ya que elimina el 99.5% de las emisiones, situación que habrá que tener en cuenta si los precios por emisión se incrementan.

6 Conclusiones y agradecimientos

Existe una gran cantidad de calor desaprovechada en las industrias manufactureras y en este estudio se analizaron cuatro configuraciones diferentes para evaluar su aprovechamiento: bomba de calor con respaldo de caldera (HTHP+GB), bomba de calor con respaldo de tubos de concentración solar de vacío (HTHP+SVT), transformador de calor por absorción con respaldo de caldera (AHT+GB) y transformador de calor por absorción con respaldo de tubos de concentración solar de vacío (AHT+SVT). El resumen de este estudio se resume a continuación:

- Desde el punto de vista de la viabilidad y facilidad de integración en el proceso actual, la configuración HTHP+GB es la mejor opción. El HTHP cubre el 52,7% de la demanda total de calor mientras que la caldera de gas actual se utiliza para cubrir el resto. El CAPEX total de esta configuración es de 169.188,2 euros y ahorra hasta un 38% de emisiones de CO₂ al año. Sin embargo, tiene un largo SPP de 19,6 años y valores DPP y ROI negativos.
- Desde un punto de vista económico, la AHT+GB es la mejor configuración. En este caso, el AHT cubre sólo el 17% de la demanda de calor, mientras que GB cubre el resto. El CAPEX total de esta configuración cuesta 75.042,8 euros y ahorra hasta un 17% de emisiones de CO₂ al año. Sin embargo, tiene un SPP razonable de 5,1 años, un DPP de 5,6 años y un ROI del 16,2%.
- Desde un punto de vista medioambiental, el AHT+SVT se considera la mejor solución. Sin embargo, necesita una superficie total para tubos de vacío ≈ 926 m². Esta configuración tiene un CAPEX total de 1.389.444,7 euros y ahorra hasta un 99,5% de emisiones de CO₂ al año. Sin embargo, tiene un valor SPP muy largo de 19,1 años y valores DPP y ROI negativos.
- Se sigue investigando en los proyectos de investigación, tecnologías que incrementen el rendimiento de COP para mejorar rendimientos medioambientales y económicos.

Los autores Jorge Payá Herrero y Abdelrahman H. Hassan, desean agradecer a la Unión Europea, ya que el proyecto PUSH2HEAT ha recibido financiación del Programa de Investigación e Innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del Acuerdo de subvención nº 101069689.

[1] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en; (b) KfW Research (2021), Transitioning to climate neutrality by 2050: a major challenge for German industry. (c) Agora Energiewende and Wuppertal Institute (2020): Breakthrough strategies for climate-neutral industry in Europe: Policy & technology pathways for Raising EU Climate Ambition.

[2] *Fostering Renewable Energy integration in the industry*, IEA RE TCP 2017

[3] Solar Paypack, 2017, based on IEA statistics and calculation by IRENA, www.solarpaces.org/new-iea-report/

[4] D. Keiner, L.Barbosa, D. Bogdavnos et al. *Global-local heat demand development for the energy transition time frame up to 2050*, MDPI, June 2021

[5] https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_operatividad