



# X Congreso Ibérico de Agroingeniería X Congresso Ibérico de Agroengenharia

Huesca, 3-6 septiembre 2019



## Mejoras en los sistemas de aprovechamiento de la energía térmica de los efluentes residuales

J.M. Magide<sup>1</sup>, H. Varela<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela. C/ Benigno Ledo, s/n. 27002 Lugo (España); josemanuel.magide@usc.es
- <sup>2</sup> Investigador colaborador externo del Grupo de Investigación Biomodem de la Universidad de Santiago de Compostela; hiram.varela@udc.es

**Resumen:** Vivimos una época en la que la sostenibilidad energética, la protección del medio ambiente y las energías limpias son el centro de atención de todo debate sobre ingeniería e industria. Una consecuencia son los innumerables esfuerzos que se destinan al aprovechamiento de las fuentes de energía residual generadas en los procesos industriales. Un ejemplo de los mismos son los efluentes residuales, un producto con frecuencia contaminante y cuya temperatura a veces es elevada. En este artículo se realiza una revisión de las principales técnicas actuales para aprovechar su energía, y se propone una nueva tecnología que mejora sustancialmente dicho aprovechamiento. Esta tecnología ha sido objeto de patente por la Universidad de Santiago, y está encaminada a mejorar la eficiencia energética de los procesos de precalentamiento de fluidos industriales; esto lo logramos aprovechando el calor de los efluentes residuales para conseguir la deshidratación de algún producto alimentario. Como es sabido, muchos alimentos incrementan su valor de mercado una vez deshidratados; el caso de más interés en esta investigación es el secado de sangre de mataderos para su conversión en la llamada harina de sangre, que es un producto de alto valor añadido. Se comprueba que la tecnología aquí divulgada supera el rendimiento económico de las principales alternativas del estado del arte.

**Palabras clave:** energía residual, valorización, secado, vacío, evaporación de múltiple efecto

### 1. Introducción

#### 1.1. Definiciones

En el presente documento se empleará la nomenclatura definida a continuación:

**Efluente residual:** un fluido de desecho del cual queremos aprovechar su energía térmica. Se emplearán como sinónimos los términos efluente, foco caliente, fluido caliente o fluido calefactor.

**Fluido de proceso:** un fluido que sea consumido por una industria para formar parte de un procedimiento industrial, caracterizado por entrar a una temperatura inferior a la del efluente residual. Se usarán como sinónimos, fluido a precalentar, fluido frío o foco frío.

**Tercer fluido:** un fluido que sea revalorizable mediante la eliminación de humedad. Como sinónimo se emplearán los términos producto, fluido a secar o concentrar.

### *1.2. Principales métodos de aprovechamiento energético*

En lo sucesivo se hará referencia a las tres principales formas de aprovechar la energía térmica de los efluentes residuales: acondicionamiento térmico, producción de energía eléctrica y precalentamiento de fluidos de proceso. Esta investigación ha desarrollado una tecnología patentada que se deriva de la tercera forma.

Cuando los efluentes a aprovechar poseen temperaturas elevadas, entendiéndose por tales las superiores a 80°C, su valorización resulta muy sencilla y poseen gran cantidad de aplicaciones. Los 80°C están muy por encima de muchas temperaturas de referencia de procesos industriales. Esto facilita la transferencia de energía térmica entre un foco caliente (el efluente) y un foco frío.

Una aplicación inmediata es el empleo del efluente como fluido calefactor para el acondicionamiento y confort térmico de habitáculos. Además de la inmediata utilidad en instalaciones ocupadas por personas, otro uso muy interesante es la calefacción en granjas de explotación animal. Por ejemplo, en instalaciones destinadas a la crianza de cerdos es necesaria una fuente de energía térmica para la calefacción de las placas metálicas sobre las que duermen los animales. En conversaciones con empresarios del sector, los autores han comprobado la gran potencialidad de esta aplicación.

Otra posibilidad es el aprovechamiento para producir energía eléctrica mediante máquinas de ciclo Rankine orgánico. Estos dispositivos emplean un foco caliente, consistente en fluidos a temperaturas normalmente por encima de 70°C, y un foco frío, por ejemplo agua de red a 10-15°C. Utiliza un fluido de trabajo de tipo orgánico, el cual evapora y condensa de forma alternativa, y como resultado se produce el movimiento de un eje mecánico conectado a un generador eléctrico. La eficiencia de estos sistemas alcanza un techo determinado por la eficiencia de un ciclo de Carnot aplicado para los mismos focos frío y caliente. Una consecuencia de ello es que el rendimiento energético es muy bajo. En los equipos comerciales más comunes, solamente entre un 8% y un 10% de la energía térmica aportada por el fluido caliente es transformada en energía eléctrica [2]. Otra desventaja de estos sistemas consiste en la elevada temperatura mínima que ha de alcanzar el fluido caliente. Los fabricantes aconsejan un rango de entre 70 y 150°C, alcanzándose los mejores rendimientos para las mayores temperaturas. Esta característica descarta el aprovechamiento de la mayor parte de los fluidos residuales industriales, que se producen a temperaturas por debajo de este rango.

Una alternativa muy extendida para el aprovechamiento eficaz de la energía térmica de efluentes residuales es el precalentamiento de fluidos fríos que entran a un proceso. Esta solución, a diferencia de las máquinas de ciclo Rankine, permite aprovechar temperaturas por debajo de 70°C [4]. El precalentamiento con efluentes es muy rentable porque suele ser un proceso que consume mucha energía, y en este caso la aportan los efluentes de forma gratuita. Incluso para pequeños aumentos de temperatura, la opción de precalentar suele ser más rentable que las máquinas de ciclo Rankine. Es común que los fluidos de proceso entren a temperatura ambiente o ligeramente inferior, en el rango 10-25°C. Si suponemos una entrada a 15°C, podemos obtener un ahorro energético importante con la simple elevación de su temperatura hasta 25°C. Esta elevación se puede conseguir con un intercambio térmico con efluentes residuales a tan sólo 30°C, lo que contrasta con los 70°C necesarios para producir electricidad. No es obligatorio que los apartados sean coincidentes con los propuestos en este modelo.

## **2. Mejoras introducidas**

La presente investigación propone una alternativa o complemento a las técnicas hasta aquí mencionadas, con la finalidad de mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de energía residual. La idea general es transferir calor desde efluentes residuales hacia fluidos de proceso

para ser precalentados, pero interponiendo entre ambos focos una o más cámaras a vacío en las cuales hierva un fluido que alguna industria quiera deshidratar, para su revalorización. De esta manera, se genera un beneficio económico por dos vías: precalentamiento de un fluido de proceso y secado de un tercer fluido o materia prima, por ejemplo leche, salmuera, zumos, sangre, etc.

Este artículo es de especial interés en las industrias agroalimentarias, ya que éstas suelen disponer de productos líquidos cuya revalorización consiste en ser deshidratados. La deshidratación puede consistir tanto en la eliminación de la mayor parte de la humedad, en cuyo caso se habla de secado, como en la eliminación de una parte del agua pero no la bastante para impedir la fluidez del producto, en cuyo caso se habla de concentrado. Ambas situaciones se contemplan en la presente invención. Una posibilidad de gran interés económico es el secado de la sangre producida en los mataderos, para formar la llamada harina de sangre. Esta harina contiene un grado de humedad de en torno al 8-12% en base seca, y su valor en el mercado es muy elevado, oscilando en la actualidad entre 500 y 1.300 €/t. Sus aplicaciones industriales son muy variadas, destacando su uso como ingrediente en la formulación de piensos para perros y gatos, pero también se emplea para elaborar filtros antigás, emulsiones asfálticas, panadería, cosméticos, vacunas y la industria química y farmacéutica en general.

La tecnología que aquí se explica es objeto de las patentes P201730019 y P201630675, tituladas “Dispositivo y procedimiento para la obtención de un producto desecado a partir de sangre o derivados” y “Sistema de desecado de sangre líquida”. Ambas son propiedad de la Universidad de Santiago de Compostela, y el lector que desee conocerlas en mayor detalle puede acceder a ellas desde la base de datos de la OEPM. El proceso técnico se detallará en los apartados sucesivos. Se hará referencia entre paréntesis a diversos elementos de las figuras, y las llamadas capas límite se señalan mediante líneas con trazo discontinuo. Dichas capas están comprendidas entre estas líneas y las superficies metálicas adyacentes. El grosor de las mismas está exagerado por motivos de claridad.

### 3. El principio de la capa límite y las resistencias térmicas

La tecnología divulgada toma como punto de partida los sistemas de aprovechamiento de energía de efluentes mediante el precalentamiento de fluidos de proceso consumidos por una industria. La novedad principal consiste en intercalar un fluido a deshidratar entre el efluente residual (foco caliente) y el fluido a precalentar (foco frío). Resulta de especial interés poder comparar los fenómenos predominantes en los supuestos con presencia y ausencia del mencionado tercer fluido. Se detallan en los apartados 3.1 y 3.2.

#### 3.1. Calentamiento directo de un fluido de proceso con un efluente residual (figura 1)

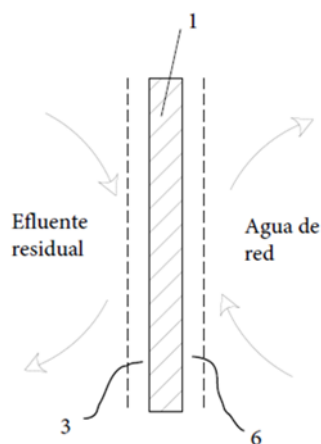
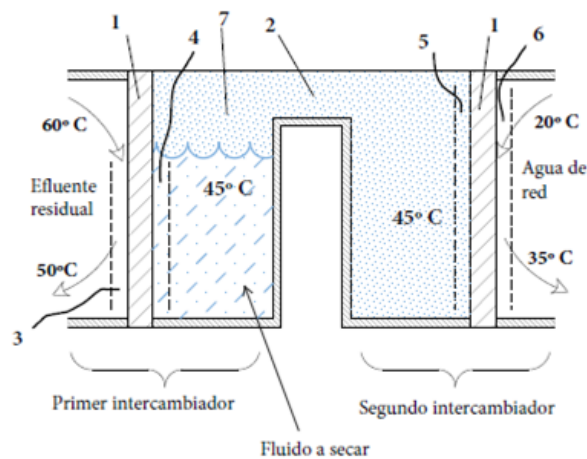


Figura 1. Caso 3.1. Transmisión de calor con presencia de 3 resistencias térmicas.

En este caso el fluido de proceso y el residual se encuentran separados por una superficie metálica (1), a través de la cual el calor pasa del primero al segundo, y no interviene ningún tercer fluido a deshidratar. La superficie metálica (1) se diseña con el menor espesor posible, para minimizar la resistencia al paso de calor y permitir un eficaz intercambio del mismo desde el fluido caliente (efluente residual) hasta el fluido frío (agua de red en la figura). El calor ha de atravesar 3 resistencias térmicas: la capa límite del fluido caliente (3), el espesor de la placa metálica (1), y la capa límite del fluido frío (6). Las capas límite son unas finas películas de fluido que permanecen adheridas sin apenas movimiento a la placa metálica (1), por efecto de la viscosidad. A través de ellas el calor se transmite mucho peor que en el resto del fluido, ya que su transferencia está gobernada por el mecanismo de la conducción térmica. Cuanto mayor sea el grosor de la capa límite, mayor será la resistencia que ésta ejerce al paso del calor. Dicho grosor depende de parámetros como la viscosidad y la velocidad del fluido.

### 3.2. Calentamiento de un fluido con interposición de un tercer fluido (figura 2)



**Figura 2.** Representación del caso 3.2. Transmisión de calor con 6 resistencias térmicas.

En este caso, como ya se ha comentado, entre el fluido caliente y el frío se interpone un tercer fluido que hierve a vacío, el cual se desea deshidratar. En esta configuración, el número de resistencias térmicas en serie que ha de atravesar el calor es de 6, y no de 3 como en el caso anterior. Más específicamente se encuentran: capa límite del efluente residual (3), espesor de la pared metálica (1) del primer intercambiador, capa límite del tercer fluido (4) en el primer intercambiador, capa de condensados (5) del vapor en el segundo intercambiador, espesor de la pared metálica (1) del segundo intercambiador y capa límite del fluido frío (6) en su paso por él. En el caso 3.2 se encuentran por tanto el doble de resistencias térmicas que en el caso 3.1. Para paliar esta desventaja, en la presente investigación se propone la incorporación de mecanismos agitadores en el interior del primer y segundo intercambiador. Estos agitadores ejercen un efecto de rascado sobre las paredes metálicas (1), de modo que rompen mecánicamente las capas límite del tercer fluido en el primer intercambiador (4) y la capa de condensado en el segundo intercambiador (5). El modelo térmico que gobierna la transferencia de calor en capas límite rotas de forma continuada es el de conducción en estado no estacionario. Este modelo se caracteriza por unos coeficientes de transferencia de calor muy elevados, hasta el punto de hacer su resistencia térmica despreciable.

Por razones de operatividad, los agitadores sólo se contemplan en el seno del tercer fluido, si bien podrían situarse en el seno de los tres fluidos (efluente residual, fluido de proceso y tercer fluido). Con el efecto ya comentado de los agitadores, el número de resistencias térmicas

del caso 3.2 se reduce de 6 a 4, quedando muy próximo al caso 3.1, con 3 resistencias. Así, en ambos casos estarían presentes las resistencias de las capas límite del fluido caliente y frío (3 y 6), y a mayores la resistencia de la pared/paredes metálicas (1). En el caso 3.1 se trata de una única pared, y en el caso 3.2 de dos. Por tanto, en este último caso la resistencia térmica global es superior al caso 3.1, debido a que existe una pared metálica más. Sin embargo, en los procesos de transferencia térmica la resistencia de las capas límite de los fluidos suele ser notablemente mayor que la resistencia de las paredes metálicas, habitualmente de poco grosor y con conductividades térmicas elevadas, y por ende ejerciendo una resistencia térmica pequeña. Como resultado, la transferencia de calor viene principalmente determinada por los dos fluidos y no por las paredes metálicas, cuyas resistencias térmicas podríamos despreciar en primera aproximación. Así, la resistencia térmica total en ambos casos 3.1 y 3.2 será parecida.

En definitiva, se interpone entre el fluido caliente y el frío un tercer fluido, que queremos revalorizar mediante deshidratación. Al existir elementos agitadores, la resistencia al paso de calor que ejerce este tercer fluido es despreciable. En otras palabras, apenas empeoramos las ventajas del caso 3.1 y añadimos a mayores el beneficio de estar deshidratando un fluido interpuesto. Como ya se ha comentado, un caso muy rentable es aquel en el que dicho tercer fluido es la sangre producida en un matadero se deshidrata hasta un 8-12% de humedad y la harina así resultante toma un valor muy alto, de en torno a 500-1300 €/t, en función de la demanda y la temperatura del proceso.

#### 4. Un caso práctico

Es frecuente encontrar efluentes residuales con una temperatura baja, como por ejemplo 60°C. Se puede considerar aguas sucias de limpieza, efluentes de una depuradora, etc. Se describe a continuación el funcionamiento de un equipo de dos intercambiadores de acuerdo con el caso 3.2 anterior. Se indican entre paréntesis referencias a elementos de la figura 2.

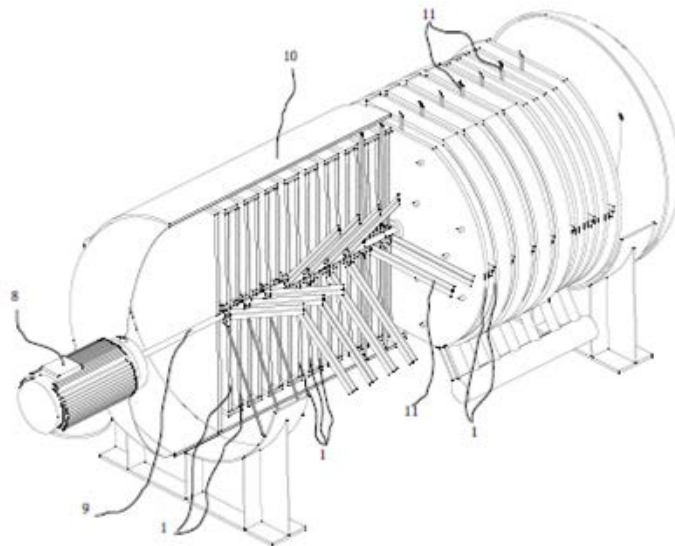
Un efluente residual a 60°C se bombea a través de un primer intercambiador de calor que posee dos cámaras estancas. La primera es aquella recorrida por el propio efluente. La segunda cámara, llamada cámara de ebullición (7), se encuentra a vacío y en ella se halla el tercer fluido, para ser secado o concentrado. El nivel de vacío es tal que permita la ebullición de este fluido por debajo de la temperatura del efluente residual. La ebullición genera vapor de agua que es conducido a través de una conducción (2) hasta un segundo intercambiador de calor, el cual posee igualmente dos cámaras estancas. En la primera de ellas circula el mencionado vapor de agua, que condensa sobre la pared (1), y en la segunda circula un fluido frío, típicamente el agua de red que consume la industria. Esta agua suele estar en el rango entre 10 y 20°C, y una proporción importante de la misma habitualmente debe ser calentada. Tal es el caso del agua que alimenta a una caldera de vapor o el agua de red que se emplea como agua de limpieza, la cual debe utilizarse a temperaturas superiores a 60°C por cuestiones de higiene y para garantizar la muerte de ciertas especies microbianas patógenas.

Existe una presión absoluta de 0,1 bar en la cámara de ebullición (7), lo cual implica una temperatura de ebullición del producto a secar/concentrar de en torno a 45°C [1]. Con estos saltos de temperatura la transferencia de calor desde el efluente residual hasta el agua de red transcurre sin problemas. En una situación típica, el efluente entra en el primer intercambiador de calor a 60°C y lo abandona a 50°C. El calor que pierde lo absorbe el producto de la cámara de ebullición (7), que hierve a 45°C. Éste produce un vapor de agua a la misma temperatura, el cual llega por una conducción (2) hasta el segundo intercambiador y allí condensa sobre la correspondiente pared metálica (1). En este proceso cede su calor de condensación a una temperatura constante de 45°C. Este calor lo absorbe el agua de red, que en un caso habitual entra al intercambiador con 20°C y lo abandona con 35°C.

El vacío presente en la cámara de ebullición (7) se mantiene por el efecto de la condensación del vapor en el segundo intercambiador, y con la ayuda de una bomba de vacío.

En un caso ideal, en el cual la evaporación del producto no produjese gases incondensables (CO<sub>2</sub>, aire, etc.), no sería necesaria la bomba de vacío, pues el propio efecto de condensar, hacer líquido, el gas presente en una cámara hermética produce una pérdida de presión de dicho gas, en tanto que deja de serlo para convertirse en un líquido. Sin embargo, en los casos reales en la industria todas las sustancias en ebullición desprenden algún gas no condensable a las temperaturas de trabajo. Por tanto, no es suficiente el condensador, haciendo falta la cooperación de una bomba de vacío que succione al exterior los gases no condensables [3]. Una desventaja de tener que emplear una bomba de vacío consiste en que además de los gases incondensables succiona también parte del vapor de agua producido con la ebullición del producto, ya que ambos gases se encuentran mezclados. Succionar el vapor de agua implica que éste no condensará en el segundo intercambiador y por tanto se pierde su energía de condensación [1]. Estas pérdidas energéticas variarán en función de la proporción de vapor de agua que succione la bomba de vacío. Una forma de minimizarlas consiste en conocer la zona de la cámara de ebullición (7) en la que se acumula una mayor proporción de incondensables, para situar en ella el punto de succión de la bomba de vacío. De esta forma se trata de disminuir la proporción de vapor de agua de la mezcla succionada. De manera estándar, suponiendo una ubicación óptima del punto de succión, se puede suponer que las pérdidas energéticas rondarán el 10% [4].

En la figura 3 se muestra una perspectiva 3D del tipo de intercambiador de calor divulgado en la patente P201630675. Se trata de un intercambiador del tipo de placas verticales, que se corresponden con las superficies metálicas (1) de intercambio térmico descritas hasta aquí. Se hallan en el interior de una carcasa (10). El intercambiador se representa seccionado para permitir visualizar su interior. Destacan especialmente los agitadores (11), que ejercen un rascado sobre las placas verticales (1), de modo que rompen mecánicamente las capas límite según lo explicado. Los agitadores se fijan sobre un eje (9) rotatorio, accionado por un motor (8) externo al intercambiador.



**Figura 3.** Intercambiador de calor con presencia de agitadores.

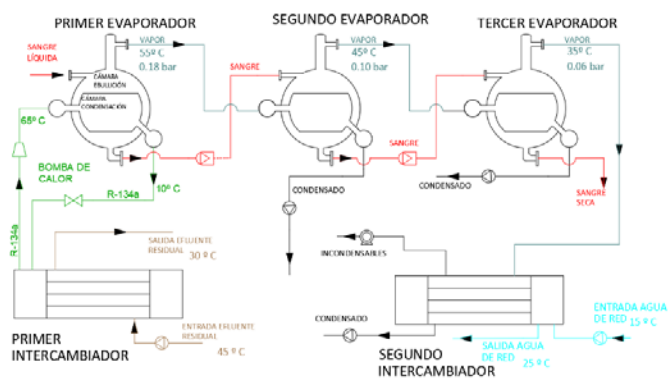
## 5. Adaptaciones técnicas

Cabe destacar el caso particular en el que la temperatura del fluido caliente está por debajo de cierto umbral que dificulta la aplicación de la tecnología aquí divulgada. Un ejemplo serían los efluentes residuales con temperaturas en el rango entre 40 y 50°C. Fluidos a estas temperaturas se producen en grandes cantidades en muchas industrias [1]. Un caso típico son

nuevamente los mataderos o industrias alimentarias en general, donde el agua de limpieza consumida se ha de aplicar a temperaturas normalmente superiores a 60°C, pero una vez utilizada se ha enfriado a temperaturas en ese rango mencionado. Para estos casos de temperaturas demasiado bajas, sigue siendo posible el aprovechamiento energético de los fluidos mediante la tecnología de la bomba de calor. En ella, un fluido refrigerante es bombeado a través de un circuito cerrado, en el cual sufre sucesivas compresiones y expansiones, con el objetivo de poder absorber la energía térmica de un fluido a baja temperatura y entregarla en otra ubicación a una temperatura superior a la de este fluido [3].

Otra variante del sistema divulgado consiste en dividir la cámara de evaporación en una pluralidad de cámaras conectadas en serie, conformando así lo que se conoce como un evaporador de múltiple efecto. En estos equipos se consigue un ahorro energético sustancial; la energía necesaria para evaporar 1Kg de agua se reduce de manera proporcional al número de evaporadores situados en serie. Así, por ejemplo, con un sistema de dos evaporadores de múltiple efecto, y despreciando las pérdidas energéticas, el coste energético de la evaporación se reduciría a en torno a la mitad, y para tres evaporadores en torno a la tercera parte [2]. Para permitir el intercambio térmico entre cada evaporador y el siguiente, sus temperaturas de ebullición respectivas serán diferentes, lo cual se consigue manteniendo niveles de vacío decrecientes. En un ejemplo típico de tres evaporadores, las temperaturas de ebullición de cada uno de ellos podrían ser de 55, 45 y 35°C respectivamente [3]. Estas diferencias de temperatura se corresponderían con diferentes presiones; como es sabido, una menor temperatura de ebullición se corresponde con una menor presión. Para el lector que desee profundizar más en la teoría de los evaporadores de múltiple efecto se le recomienda la obra de Warren McCabe, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.

En la figura 4 se muestra un esquema unifilar del equipo de la patente P201630675, empleando la simbología común en Ingeniería Química. Se indican el primer y segundo intercambiador; se observa un sistema de tres evaporadores conectados en serie. Cada evaporador posee dos cámaras: una interna, de condensación, y una externa, donde hierve el producto a secar o concentrar. Se identifican por colores los distintos circuitos. El circuito del producto a secar, en este caso sangre de mataderos, está en color rojo; el vapor de agua que se desprende de la ebullición de la sangre, en azul oscuro; y el foco frío, en este caso agua de red a precalentar, azul claro. El efluente residual se representa en color marrón y la bomba de calor en verde; ésta es necesaria porque el efluente llega a una temperatura tan baja como 45°C. La bomba recircula el fluido refrigerante R-134a, que evapora a 10°C en el primer intercambiador, absorbiendo energía del efluente, y después un compresor eleva su presión para lograr que condense a 65°C en el primer evaporador. En trazo negro se representa el drenaje de condensados y la succión de los gases incondensables.



**Figura 4.** Esquema unifilar de instalación para aprovechamiento de energía de efluentes residuales. Comprende bomba de calor y tres evaporadores.



## 6. Comparativa de las diversas técnicas

La tabla 1 refleja los rangos de la temperatura del efluente residual que permiten un correcto funcionamiento de las técnicas de aprovechamiento energético explicadas hasta aquí. Los sistemas de producción de energía eléctrica están en clara desventaja, pues efluentes por debajo de 70°C dejan de ser aprovechables. Su aprovechamiento resulta muy bajo y por eso no se incluye en la tabla. Los sistemas de acondicionamiento y precalentamiento ofrecen una sustancial mejora, alcanzándose las temperaturas más bajas para los sistemas con bombas de calor. La patente P201630675 contempla una bomba de calor con capacidad de emplear un refrigerante que evapora por debajo de 10°C, con lo cual temperaturas del efluente por encima de 20°C empiezan a ser útiles.

**Tabla 1.** Comparación entre las técnicas más importantes para aprovechar energía de efluentes.

Técnica	Rango de temp.(°C)	Valoriz. (€/t)
Acondicionamiento de habitáculos	80-40	2,95
Precalentamiento de fluidos de proceso	80-40	2,95
Secado con bomba de calor	80-20	9,20
Secado, con bomba y 3 evaporadores	80-20	13,41

En cuanto a la valorización, con el fin de poder comparar todos los procesos, se ha considerado que se dispone de una tonelada de efluente a 80°C, el cual es enfriado hasta la menor temperatura de cada rango. Para el cálculo se considera una equivalencia con el gasoil C necesario para generar la misma energía. Se toma un precio de 0,7€/l. En los procesos de secado se ha considerado el caso particular de la harina de sangre, a un precio de venta de 500€/t, y unos costes de fabricación de 287€/t con un evaporador y 115€/t en el caso con 3 evaporadores. Se aprecia que los mayores beneficios son generados cuando se interpone entre efluente y fluido de proceso un tercer fluido a secar o concentrar.

## 7. Conclusiones

Los efluentes residuales de la industria suelen poseer una carga energética importante, la cual puede generar cuantiosos beneficios si es correctamente valorizada. De entre todas las técnicas con presencia en la actualidad, la que parece ofrecer mayor rentabilidad es el precalentamiento de fluidos de proceso. Si además se intercala entre los fluidos caliente y frío un tercer fluido a deshidratar, la rentabilidad puede aumentar a más del triple del valor original.

## Referencias

1. Del Arco Vicente L. Termotecnia. Calor industrial. 1985, 85-120.
2. Magide J.M., Méndez M., González X.P. Termotecnia. 2010, 3.1-3.16
3. McCabe W., Smith J., Harriot P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 2007, 482-517.
4. Moran M., Shapiro H. Fundamentos de termodinámica técnica. 2012, 315-395.