

## **Tecnologías de recuperación y aplicaciones del calor residual de procesos industriales**

Carlos Alberto López González  
Ingeniero electricista,  
Especialista en docencia universitaria,  
Estudios de Posgrado en eficiencia energética  
Docente cátedra Tecnológico Pascual Bravo  
calg@epm.net.co

### **Resumen**

*Gran número de actividades industriales son generadoras de calores residuales, susceptibles de valoración económica y posible recuperación, se presenta una descripción de tecnologías para la recuperación de calor de acuerdo con su temperatura, se incluye la energía térmica solar. Se propone el uso de calores recuperados en sistemas de refrigeración por absorción, y el secado de lodos industriales dadas sus alentadoras perspectivas de operación económica y ambiental.*

**Palabras claves:** *Bombas de calor, Calor residual, intercambiadores de calor recuperación de calor, refrigeración por absorción, secado de baja temperatura.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

En el documento “Tecnologías de recuperación y aplicaciones del calor residual de procesos industriales” se presenta una compilación que describen las tecnologías de recuperación más frecuentes de calores residuales, incluyendo la energía térmica solar

Se enfatiza la recuperación de calores residuales como opción de conservación de energía, se describen las generalidades tecnológicas de cada sistema de recuperación, se destaca la energía térmica solar como alternativa del sector productivo y se renueva el interés por el uso de calores residuales recuperados en aplicaciones de sistemas de refrigeración por absorción y en secado de lodos industriales.

### **2. EL CALOR: UN RECURSO RENOVABLE**

El hombre ha obtenido el calor a lo largo de su historia a partir de la combustión de algún combustible renovable o no renovable y lo trata como un recurso que desaparece luego de su utilización, a diferencia

de ciertos animales su órgano de la visión no lo percibe, por lo cual no tiene conciencia de su existencia más que por sus efectos.

En la producción industrial a gran escala es donde se consumen las más grandes cantidades de calor obtenido predominantemente de fuentes no renovables, el hombre asume equivocadamente, que ese calor ha quedado incorporado a los productos. El calor invertido en procesos industriales, lo mismo que el disipado en las sucesivas transformaciones, se disipará finalmente en el medio y con él los recursos económicos invertidos.

Hasta nuestros días la recuperación de calor se hace fundamentalmente por razones económicas, sin embargo las crecientes restricciones ambientales están siendo acompañadas de incentivos económicos a los proyectos de recuperación de calor que reduzcan el consumo de energías primarias contaminantes.

Teóricamente es posible reutilizar en forma ilimitada el calor de un proceso, y asumir su costo solo una vez, esto por supuesto no es posible hacerlo mas que con ciertas restricciones económicas. El calor recuperado no se compra de nuevo, no consume energía primaria y no contamina. Se reconocen tres fuentes de calor residual:

- Gases de combustión
- Flujos de productos
- Caudales de agua.

La energía térmica solar es otra fuente de calor de baja temperatura que no cabe en la denominación de residual ya que no tiene ese origen y que se encuentra como:

- Energía radiante, y
- Calor latente de evaporación de la humedad del aire

### **3. CALORES RESIDUALES CARACTERIZACIÓN**

Los gases de combustión tienen temperaturas relativamente elevadas mientras que los caudales de agua tienen temperaturas moderadas o bajas [LOP 03], Los flujos de productos son generalmente líquidos a temperaturas moderadas o bajas, aunque a veces aparecen también como productos sólidos y también como gases a alta presión, la energía térmica solar en forma radiante puede ser captada directamente por colectores de diversos tipos y aprovechada directamente como agua caliente sanitaria o como foco frío para bombas de calor, por su parte el calor latente de condensación contenida en la humedad del aire puede ser recuperada en evaporadores de bombas de calor y aprovechado en forma sensible en diversidad de procesos en el lado del condensador.

La energía de estos tipos de calores residuales se puede recuperar y utilizar básicamente de tres maneras distintas: Producción de trabajo Mediante expansores directamente accionados o a través de sistemas térmicos; calefacción de procesos y edificios mediante el uso de intercambiadores de calor o bombas de calor; refrigeración de procesos y de edificios mediante dispositivos de expansión directa o sistemas accionados térmicamente.

### **4. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

La energía radiante originada en el sol es prácticamente la causa generadora de casi todas las fuentes de energía disponibles en nuestro planeta [GAR 97]. Las transformaciones artificiales de las radiaciones solares mas difundidas en nuestros días son las termoconversión y la conversión fotovoltaica. La intensidad de la energía solar es baja lo cual es una desventaja para nuestro nivel de consumo, pero tiene la ventaja de que es limpia, abundante e inagotable. La radiación solar puede ser estimada mediante expresiones matemáticas simples como la correlación de Ångström, que en el caso de Medellín arroja resultados del orden de 9 KWH por cada metro cuadrado (meses de Enero y Febrero) Los costos económicos de la energía obtenida a partir de sistemas térmicos solares son sin duda los más bajos de la canasta de energéticos, en esta clasificación puede, también, ser incluida la humedad atmosférica.

La humedad atmosférica puede ser definida como la humedad (vapor de agua) presente en el aire. El agua en estado de vapor dispone de una entalpía mayor que la correspondiente al estado líquido, veamos. El agua a nivel del mar tiene una temperatura de ebullición de 100° Centígrados, a esta temperatura tiene una entalpía de 180 BTU / libra. Si al agua a 100°C y a presión atmosférica se le agrega mas calor, su temperatura no subirá pero empezará a evaporarse. Al calor entregado que no se manifestó en aumento de temperatura se denomina calor latente de evaporación, para evaporar completamente una libra de agua de 100° C se requiere una cantidad de calor de 970 BTU. En otras palabras una libra de agua a 100° C tiene una entalpía de 180 BTU y una libra de vapor también a 100°C tiene una entalpía de 1150 BTU. Un aire atmosférico con elevada humedad relativa como la que se tiene en latitudes tropicales, significa una alta concentración de energía térmica en forma de calor latente de condensación, que representa un recurso energético, abundante, limpio y de bajo costo, ya que la energía necesaria para evaporar los millones de toneladas que a diario recorren la atmósfera de la tierra, ha sido aportada por el sol.

## Tecnología

### 5. TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN

Se presenta a continuación una descripción de las características básicas de las diferentes tecnologías de recuperación de calores residuales consideradas como importantes para su aplicación industrial.

#### 5.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor están disponibles en el mercado en una gran variedad de tipos, [LOP 03,a ]:

- De tubo y carcasa
- Rotativos
- De placas
- De fluido intermedio (sistema bi-transfer)
- Tubos de calor

Los intercambiadores son equipos idóneos para la recuperación de calores residuales y pueden trabajar con caudales de gases, líquidos o vapor, tanto en el lado del calor residual como en el de uso en un amplio rango de temperaturas.

*5.1.1 Intercambiadores de placas:* Los intercambiadores de placas están teniendo una amplia aplicación en una gran variedad de industrias,[MOL 93a] en particular en el subsector alimentario.

Los fluidos primario y secundario están separados por una fina pared metálica corrugada, con el fin de alcanzar así la máxima transferencia de calor mediante la creación de las adecuadas turbulencias. El principal competidor del intercambiador de placas es el convencional de tubo y carcasa. Aunque su eficiencia ha mejorado notablemente en estos últimos años, el intercambiador de tubo y carcasa presenta ciertos inconvenientes asociados a su tamaño relativamente grande y a la deficiente distribución del líquido. Además, su limpieza puede ser difícil y en general, las pérdidas de carga que origina son bastante elevadas.

*5.1.2 Caloductos:* Un caloducto (Heat Pipes),[GAR 97], es un tubo cerrado conteniendo en su interior un fluido de trabajo y una estopa, en la que tiene lugar un efecto de capilaridad. Si se suministra calor a un extremo del tubo, el líquido en ese extremo se evapora y el vapor circula hacia las zonas frías del tubo donde condensa, cediendo el calor de condensación.

Debido a que para el retorno del líquido a la región donde se evapora el caloducto se basa en el efecto capilar, su eficiencia depende en gran medida de su inclinación respecto a la horizontal, así como del tamaño de los poros y de la tensión superficial del fluido. Además, la energía transportada está asociada a la entalpía de vaporización del fluido de trabajo, que deberá ser lo más elevada posible. densidad, así como de la relación de gastos de gas caliente y frío. En la actualidad, los Caloductos se pueden utilizar para temperaturas hasta 350 °C, aunque existen también especiales para valores superiores. Sus principales aplicaciones se pueden cifrar en los casos siguientes:

- Recuperación de calores de proceso, para precalentamiento de aire o de algún gas para ese proceso
  - Recuperación de calores residuales de proceso para calefacción de locales.
  - Recuperación en acondicionamiento de aire, para precalentar en invierno o preenfriar en verano.

*5.1.3 Intercambiadores bi-transfer:* El sistema consiste en dos intercambiadores conectados a través de un circuito conteniendo un fluido que es el medio para el transporte del calor,[GAR 97a].

El fluido se calienta a su paso a través del intercambiador colocado en el fluido de gases calientes. Mediante una bomba se la hace circular hasta el intercambiador colocado en el conducto de gases fríos, donde cede el calor. Su principal ventaja respecto a los Caloductos estriba en el hecho de que permite efectuar el intercambio de calor estando ambos conductos de gases calientes y fríos distantes entre sí. La utilización de la bomba re presenta una desventaja, debida a su consumo de trabajo y a que requiere un mantenimiento alcanzándose valores que oscilan entre 45 y 70%. Para una determinada superficie de intercambio, se selecciona la capacidad térmica del flujo así como la relación de áreas de ambos intercambiadores de manera que se consiga la máxima eficiencia. El fluido se selecciona en función de las temperaturas de operación. Normalmente se emplea el agua y para temperaturas de operación superiores se utilizan fluidos como el Thermex o el Dowtherm.

*5.1.4 Regeneradores rotativos:* El regenerador rotativo, también denominado intercambiador Ljungstrom,[MOL 93b], ha sido utilizado durante

muchos años para precalentamiento del aire en instalaciones de combustión. Conforme la rueda gira, absorbe calor del flujo de gases calientes que pasa a su través y transfiere posteriormente este calor al flujo de gases fríos. Un desarrollo posterior, la rueda higroscópica, permite transferir también calor latente además de sensible. Este tipo de intercambiador trabaja eficazmente en situaciones en que la diferencia de temperatura entre los flujos caliente y frío es muy pequeña, de forma que los Caloductos funcionarían de manera muy poco eficiente en esas condiciones. El tipo de material utilizado en la rueda, metálico o cerámico, depende del rango de temperaturas de trabajo.

**5.1.5 Economizadores:** Generalmente al economizador se le considera un sistema de recuperación de calor exclusivo de las calderas, [LOP 03a], cuando en la realidad sus aplicaciones se extienden a numerosos procesos donde la energía de un caudal de gases calientes puede ser utilizada para calentar agua. Generalmente se construyen de acero, de tubos con aletas soldadas. Los dos aspectos principales que deben considerarse al utilizar los economizadores son: por un lado, la temperatura máxima en el lado del agua y por otro, la temperatura mínima en el lado del gas. En efecto, si se evapora parcialmente el agua en el economizador se puede producir el indeseado golpe de ariete. Por otro lado, si se extrae demasiado calor del flujo de gases y se producen condensados ello puede dar origen a importantes problemas de corrosión. Existen, no obstante, distintas técnicas para mejorar las prestaciones del economizador y al mismo tiempo superar ambos problemas.

**5.1.6 Calderas de recuperación:** A diferencia de las convencionales, las calderas de recuperación no tienen su propio sistema de combustión sino que utilizan los gases calientes procedentes de reacciones químicas que se han producido en otro lugar, [MOL 93b], por ejemplo, un horno. Generalmente, se utilizan para la producción de vapor, aunque también pueden generar agua caliente o algún otro fluido térmico.

- Es uno de los equipos de recuperación de calor más compacto, ya que el proceso de evaporación se realiza con un elevado coeficiente de transferencia de calor.

- Son instalaciones con un coste de capital inferior a cualquier otro sistema de recuperación comparable.

- Debido a que las altas velocidades de transmisión de calor mantienen los tubos a una temperatura relativamente baja, pueden trabajar con gases a elevada temperatura sin presentarse problemas de selección de materiales o de duración de la instalación.

- Una característica muy interesante es que su velocidad de respuesta es rápida. De la misma forma que los generadores de vapor convencionales, las calderas de recuperación pueden ser de tres tipos: piro-tubulares, acuotubulares y compactas.

**5.1.7 Recuperadores:** Un recuperador es un intercambiador gas / gas utilizado generalmente para recuperar calor de gases calientes [LOP 03b]. Su aplicación más frecuente es en el precalentamiento de aire de combustión en hornos y calderas y en este aspecto, es un competidor directo del regenerador rotativos. Hay dos tipos básicos de recuperadores, según que se basen en el mecanismo de la convección o de la radiación. Los de convección se utilizan para temperaturas inferiores a 100 °C. Aunque en un principio se construyeron con materiales cerámicos, se presentaron numerosos problemas de fugas, por lo que han sido sustituidos por los metálicos. Para aplicaciones a bajas presiones se utilizan los de tubos de fundición, bien lisos o con aletas de distinta geometría. Los recuperadores de radiación tienen la forma de dos cilindros concéntricos; el aire a ser calentado generalmente circula por el anillo exterior, mientras que los gases calientes lo hacen por el conducto central.

## 5.2 CICLO DE RANKINE

Los sistemas de recuperación de calores residuales que generan trabajo mecánico basados en el ciclo de Rankine [LO P03b], se pueden clasificar en los grupos siguientes:

- Por el tipo de fluido de trabajo, pueden ser de vapor o fluido orgánico.

- Atendiendo la configuración del ciclo, pueden ser de ciclo simple o de ciclo regenerativo.

- Por la forma de la energía producida, trabajo mecánico o electricidad.

Los ciclos de Rankine tienen la capacidad de alcanzar rendimientos elevados en un amplio rango

## Tecnología

de temperaturas. Pueden utilizar calores residuales con temperaturas que van desde 70 °C a 1.200 °C

**5.2.1 Configuración de ciclo simple:** El vapor generado mediante el caudal residual se expande en la turbina y condensa en un condensador. El calor disipado en el condensador se cede al agua de enfriamiento, completándose el circuito mediante una torre de enfriamiento. La turbina produce energía mecánica o acciona un generador eléctrico. Esta configuración se utiliza con fluidos orgánicos (R11) así como con vapor de agua, en este caso en unidades de pequeña potencia (< 7.000 Kw.). En plantas de vapor de mayor potencia, se utiliza una configuración diferente con vapor a dos presiones. El vapor a baja presión se genera generalmente como saturado y se utiliza para precalentamiento del agua en una configuración de ciclo regenerativo. La potencia específica (Kw/Kg/h) en estos ciclos es elevada, ya que se consiguen temperaturas de entrada a la turbina relativamente elevadas y simultáneamente se reduce la temperatura del caudal residual hasta un valor reducido. Este tipo de configuraciones se suelen utilizar en ciclos combinados

**5.2.2. Configuración de un ciclo regenerativo:** Esta configuración se utiliza con fluidos orgánicos (tolueno) trabajando a temperaturas relativamente elevadas. Una porción de la entalpía del vapor que sale de la turbina se transfiere vía un intercambiador de calor regenerativo para precalentar el líquido procedente de la bomba de alimentación a la caldera.

En general, es más eficiente que el ciclo simple y por consiguiente, presenta una potencia específica mayor. En consecuencia, se reduce el rendimiento del ciclo mejora si el vapor a la salida de la turbina está ligeramente recalentado. Es ésta una condición que no se va a cumplir sin el fluido de trabajo. Los sistemas construyen en módulos, para así limitar al máximo los costos. Los sistemas de limpieza, torres de enfriamiento, etc. se suministran como módulos separados

### 5.3 CICLO BRAYTON:

Dos tipos de caudales residuales pueden ser utilizados en aplicaciones de la turbina de gas:

- Caudales de gases con energía química, que puede ser utilizada directamente como combustible en la turbina.
- Caudales con una temperatura elevada que pueden ser utilizados para transferir calor al fluido de trabajo de la turbina.

Los combustibles residuales, si se utilizan en la turbina, han de estar muy limpios y libres de todo constituyente corrosivo o abrasivo; asimismo, los productos de la combustión no han de ser corrosivos, ni tóxicos.

### 5.4 BOMBAS CALOR

Una bomba de calor es un dispositivo que funciona según un ciclo termodinámico, absorbiendo calor de un foco a baja temperatura y transfiriéndolo a otro de temperatura más elevada mediante el consumo de trabajo, [GAR 97b]. Así pues, la bomba de calor presenta la particularidad de ceder más energía que la que consume, una condición necesaria si va a ser utilizada como un sistema de recuperación de calor. En definitiva, las bombas de calor permiten pasar calor de un foco de menor temperatura a otro de temperatura mayor.

El compresor es el componente más importante en una instalación de bomba de calor. Generalmente se han venido utilizando compresores alternativos, ya que permiten alcanzar altas relaciones de compresión y mantienen un rendimiento aceptable trabajando a cargas parciales. En las unidades herméticas y semiherméticas el motor eléctrico y el compresor se encuentran dentro de la misma carcasa. En la recuperación de calores residuales de procesos industriales, tanto los compresores centrífugos como los de tornillo presentan un gran potencial de aplicación.

Tanto vapor como fluidos orgánicos pueden ser utilizados como fluidos de trabajo en el ciclo de potencia, en tanto que para el ciclo de frío sólo se utilizan fluidos orgánicos. Las exigencias respecto a las características contaminantes del calor residual son las mismas para la bomba de calor que para otras tecnologías que utilizan intercambiadores como interface con el caudal residual. Se pueden tolerar niveles de contaminación bajos sin necesidad de un dispositivo de limpieza, aunque el ensuciamiento de las superficies de transferencia afectará

indudablemente al tamaño del sistema y en definitiva a su costo

### 5.5 EXPANSORES

Son unos interesantes sistemas de recuperación, ya que transforman directamente la energía residual en trabajo [LOP 03c]. Han sido utilizados en numerosas aplicaciones industriales, sobre todo en la industria del acero y la petroquímica. En lugar de descargar directamente al ambiente un caudal residual de gases o vapores lo podemos hacer a través de un expansor, produciendo así la energía mecánica. En el caso de los gases, se necesitan presiones de como mínimo 20 psig o superiores para que el expansor pueda ser utilizado de forma efectiva. No obstante, si el caudal es un vapor condensable se pueden utilizar caudales con presiones próximas a la atmosférica e incluso inferiores

### 5.6 QUEMADORES

La recuperación de calores residuales mediante la combustión de caudales de gases conteniendo componentes combustibles constituye una atractiva y relativamente barata medida de conservación de la energía. Existen numerosos casos de gases de proceso conteniendo hidrocarburos o monóxido de carbono, que mediante su combustión, pueden liberar una importante cantidad de energía. Esta energía puede ser utilizada para generar vapor o calor a procesos. Obviamente debe siempre tenerse cuidado de que esos gases no contengan sustancias tóxicas o contaminantes y que tampoco se formen en su combustión. Además, el poder calorífico debe ser lo suficientemente elevado como para que esta combustión pueda realizarse y tenga un interés económico.

## 6. USOS DEL CALOR RESIDUAL

### 6.1 REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

El coste inicial de una planta frigorífica de absorción resulta, en la mayoría de los casos, [GAR 97b], superior al de un equipo de compresión mecánica de la misma capacidad. La razón para esta diferencia está en la muy superior cantidad de materiales metálicos que son necesarios para la fabricación de los intercambiadores de calor, en equipos que se basan en procesos termodinámicos sin prácticamente aportación del equivalente térmico del trabajo mecánico. Sin embargo, cuando se analizan los costos de explotación a partir del valor de las energías consumibles, la balanza puede

*Tecnologías de recuperación y aplicaciones del calor residual de procesos industriales*

desplazarse a favor de los equipos de absorción, si se dan las condiciones de partida necesarias como el C.O.P. entendido éste como: "La cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración.

### 6. 2 SECADO DE LODOS INDUSTRIALES

Los lodos producidos en procesos industriales presentan diferentes características física y químicas, [UND 03], y su destino final debe ser analizado en cada caso. El secado térmico ofrece la ventaja de la reducción y, en ocasiones, valorización de los residuos, favoreciendo su tratamiento final. Se debe analizar el costo actual de su tratamiento, incluyendo los conceptos de manipulación, transporte, inertización, vertedero, incineración, etc., la eliminación del agua por vía térmica, aun requiriendo un consumo energético, es generalmente más favorable que su destino habitual formando parte del lodo. El nivel de secado requerido estará en relación con la de lodos, lo que prima es la cantidad física real de agua eliminada. Generalmente, la humedad residual se sitúa entre el 20 y el 30%, conseguir mayores niveles de sequedad no compensa el coste energético y de inversión. obsérvese que la eliminación de un 5% de agua, para bajar del 80 al 75% de humedad, representa 200 Kg. de agua por cada 1.000 Kg. de lodo, mientras que el mismo 5%, para bajar del 20 al 15% de humedad representaría solamente 59 Kg. por cada 1.000.

Agotadas las posibilidades de la deshidratación mecánica de lodos, y considerando la necesidad de minimizar los residuos, tanto por razones económicas como medioambientales, la deshidratación térmica se abre como una nueva tecnología que ofrece a la industria la posibilidad de reducir sustancialmente la generación y el vertido de lodos. Así, se consigue una disminución directa del coste medio-ambiental y convierte esta tecnología en un elemento básico a introducir en el esquema general de la depuración de las aguas residuales.

Se está aplicando también la tecnología de "bomba de calor" para la aportación de los gases calientes, al mismo tiempo que permite la condensación de los vapores formados. Por otra parte, el secado "indirecto" se lleva a cabo mediante la utilización de vapor saturado o aceite térmico como medios de aportación calorífica. Teniendo en cuenta las consideraciones técnicas desarrolladas en los párrafos anteriores, se destaca una tecnología especialmente desarrollada para el secado de lodos en las depuradoras industriales

## Tecnología

basada en un secado indirecto que utiliza vapor de agua saturado a la presión de 7 bar. La aportación calorífica se basa en la capacidad de acumulación de calor del vapor saturado, sin necesidad de recurrir a altas temperaturas, y un gran desarrollo superficial que consigue una máxima transmisión de calor ocupando una mínima superficie, factor que ha sido optimizado mediante su diseño modular. El sistema de manipulación y transporte del lodo, por el interior del secador, ha sido diseñado para poder abordar cualquier tipo de fango sin necesidad alguna de recurrir a la recirculación de sólidos secos.

### Conclusiones

La recuperación de calores residuales es una actividad conducente a la competitividad económica y ambiental de las empresas industriales.

Existe amplia oferta tecnológica en materia de opciones de recuperación de calor residual, con características especiales para cada caso.

Se recomienda desarrollar metodologías para la valoración de tecnologías de recuperación de calores residuales y su uso productivo.

### Referencias

1. [GAR 97] M. García Galludo. Auditorías energéticas y Ahorro de Energía. Seminario internacional, Bogotá, 1997.
2. [LOP 03] L. López González. Características básicas de las tecnologías de recuperación de calores residuales, [www.energuia.com](http://www.energuia.com)
3. [MOL 93] L. Molina Igartúa. Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria. Ente Vasco de la Energía, Bilbao, 1993.
4. [UND] M. Undebarrena. Deshidratación térmica de lodos en el ámbito industrial, [www.energuia.com](http://www.energuia.com)
5. [MOL 93] Molina Igartúa. Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria. Ente Vasco de la Energía, Bilbao, 1993.
6. [UND] M. Undebarrena. Deshidratación térmica de lodos en el ámbito industrial, [www.energuia.com](http://www.energuia.com)

