



Valorización de calores residuales en aplicaciones industriales mediante ciclos de cola con tecnología ORC

Palabras clave: ciclos de cola, ORC, Rankine, calores residuales

Key words: bottom cycles, ORC, Rankine, waste heats.

Resumen

La mejora de la eficiencia energética para las empresas es una necesidad, más en el momento actual de exigencia de aumento de la competitividad. En el sector industrial a menudo existen calores residuales que normalmente son disipados al exterior por tener media o baja temperatura (por debajo de 300°C). Parte de esa energía térmica puede ser convertida en electricidad con los denominados ciclos de cola. Dichos ciclos no se han desarrollado masivamente porque tradicionalmente se recurría a ciclos de Rankine con vapor de agua, que no resultan los más apropiados para este tipo de energía térmica. Sin embargo, hoy día está disponible la tecnología de ciclos de Rankine orgánicos (ORC) que resulta especialmente adecuada para plantas de media y baja capacidad, es muy compacta, y se adapta bien a focos térmicos de media y baja temperatura.

Este artículo explica los fundamentos de la tecnología ORC, presentando sus configuraciones más habituales, expone criterios de viabilidad económica y concluye con una comparativa de los ciclos ORC con los de vapor de agua en un caso práctico.

Abstract:

The improvement of the energy efficiency is a necessity for companies, especially at the present situation when a competitiveness enhancement is required. Industrial sector often exhibits waste heats that usually are reject to the environment due to their temperature range is low (below 300°C). A part of that energy can be converted into electricity by means of the so called bottom cycles. Such cycles have not been massively developed due to the sector usually has preferred steam cycles, which are not the most suitable ones for this application. However, today the Organic Rankine Cycle (ORC) is an available technology which is especially suitable for mid to low power plants, is very compact and runs well with heat sources of mid to low grade temperature.

This paper explains fundamentals of the ORC technology, showing its usual layouts, gives feasibility criteria and concludes with a comparison between organic and steam Rankine cycles in a case of study.



José Ignacio Linares Hurtado

Doctor Ingeniero Industrial del ICAI. Profesor Propio Ordinario en el ICAI, donde imparte Termodinámica y otras asignaturas del área energética y dirige desde 2008 el Departamento de Ingeniería Mecánica. Desarrolla su investigación en la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas en eficiencia energética, sistemas térmicos y ciclos de potencia avanzados.

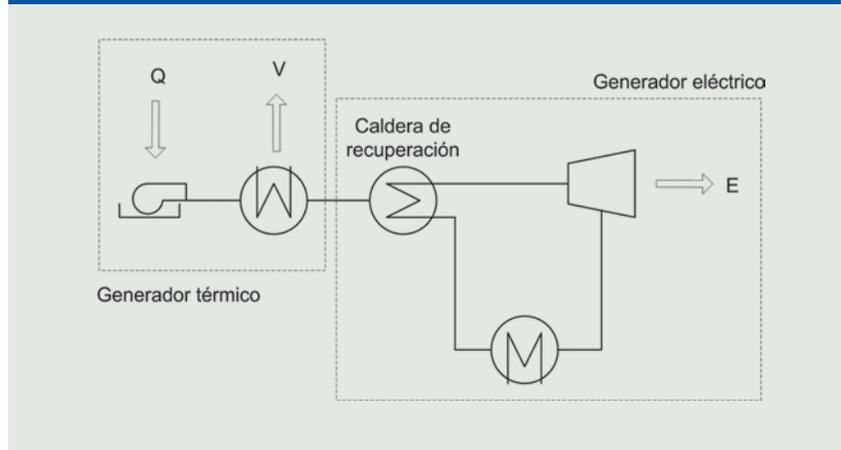
Introducción

En el actual contexto de crisis energética resulta esencial mejorar la eficiencia energética, pero para las empresas es importante que tal mejora vaya acompañada de una eficiencia económica, es decir, que pueda recuperarse la inversión en un plazo razonable. Una posibilidad de mejora de eficiencia energética en muchas industrias es la conversión de calores residuales en electricidad mediante los denominados *ciclos de cola*, que no dejan de ser sino un tipo de cogeneración. Así, la energía térmica residual procedente del proceso productivo de la industria donde vaya a aplicarse la cogeneración se recoge en una caldera de recuperación por cuyo secundario circula el fluido de trabajo de un ciclo termodinámico. La Figura 1 muestra un esquema básico de este tipo de plantas. El esquema es un tipo de cogeneración porque en la mayoría de las aplicaciones el proceso productivo habrá convertido en calor útil, V , (hornos, secaderos...) la energía primaria suministrada, Q , convirtiendo el ciclo de cola parte del calor residual ($Q-V$) en electricidad, E .

La caldera de recuperación es un elemento clave en un ciclo de cola condicionando el diseño del mismo. Conceptualmente el diseño de un ciclo de cola no dista mucho del de un ciclo de vapor en un ciclo combinado. Sin embargo, el carácter residual de los calores recuperados hace que los resultados numéricos sean sensiblemente



Figura 1. Esquema de un ciclo de cola



diferentes. En efecto, la temperatura del calor a recuperar normalmente no excede de 300°C (unos 250°C por debajo de un ciclo combinado), dado que el proceso productivo previo habrá sido optimizado con todas las integraciones térmicas posibles. Dicho calor suele estar disponible en una corriente de gases, de aceite, de agua caliente... que ha de ser enfriada tanto como sea posible. Estas peculiaridades son las que justifican que los ciclos de cola se diseñen con criterios específicos, no siendo recomendable una mera generalización de los ciclos combinados.

Desde los 80 y 90 del siglo pasado [1,2,3] se viene planteando una variante de los ciclos de Rankine convencionales denominada ciclo de Rankine orgánico (ORC), consistente en sustituir el agua por un fluido orgánico

(hidrocarburo, refrigerante...) cuyas propiedades le permiten realizar un mejor seguimiento del perfil T-Q, además de otras ventajas constructivas.

En la actualidad hay un resurgimiento de los ciclos ORC, tanto en ciclos de cola como en aplicaciones de baja temperatura [4,5,6] (solar, geotermia, ciclos combinados con motores alternativos, microturbinas y pilas de combustible...).

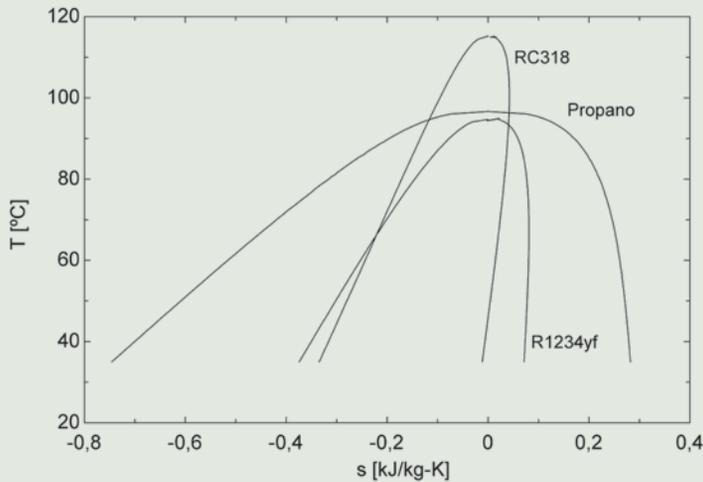
Fluidos orgánicos

Los fluidos orgánicos presentan unas peculiaridades que les confieren ventajas sobre el agua en los ciclos Rankine: pendiente nula o positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s, reducida entalpía latente de vaporización, temperatura y presión crítica reducidas, y presión de condensación a temperatura ambiente superior a la atmosférica.

Una pendiente nula o positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s significa que la entrada a la turbina puede realizarse en vapor saturado sin riesgo de tener humedad a la salida de la misma. Los fluidos orgánicos se pueden catalogar como secos, isentrópicos o húmedos, dependiendo de la pendiente de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s. La Figura 2 muestra un fluido de cada tipo.

El hecho de que la entalpía de vaporización sea reducida supone que gran parte del proceso de aporte de calor (normalmente más de la mitad) se va a realizar sin cambio de fase. Esto es enormemente ventajoso pues permite

Figura 2. Diagrama T-s de diversos fluidos orgánicos (referenciados a la entropía crítica de cada uno)



que la caldera de recuperación sea un simple intercambiador de calor; exactamente igual que ocurre con los evaporadores de los ciclos frigoríficos (salvo los de amoníaco, que presentan una elevada entalpía de vaporización). De este modo el equipo del ciclo ORC se simplifica mucho, siendo más compacto que el de agua-vapor equivalente.

La temperatura crítica es propia de cada fluido, pero en los de interés para los ciclos ORC resulta siempre inferior a 250°C. Este hecho, unido a que la presión crítica no resulta elevada (por debajo de 50 bar), permite plantear la realización de ciclos ORC supercríticos de forma mucho más simple que cuando se emplea agua.

En cuanto a la presión de condensación es interesante que a temperatura ambiente sea superior a la atmosférica con objeto de evitar la entrada de aire en el circuito. Al no existir el riesgo de entrada de aire desde el exterior no es preciso utilizar los desaeradores o los sistemas de extracción de incondensables del condensador propios de las centrales térmicas que operan con agua.

Los fluidos orgánicos básicamente son hidrocarburos, que pueden ser naturales (propano, butano, pentano, hexano, octano, nonano, dodecano ...) o halogenados como los empleados en refrigeración (R134a, R218, R245fa...). Los hidrocarburos naturales de bajo

número de carbonos (propano, butano y pentano) presentan una temperatura crítica por debajo de 250°C y una presión de condensación a temperatura ambiente superior a la atmosférica (o muy poco más baja en el caso del n-pentano); por el contrario, los hidrocarburos de elevado número de carbonos presentan temperaturas críticas superiores pero también presiones de condensación a temperatura ambiente de vacío. En este aspecto (temperatura crítica y presión de condensación) los hidrocarburos halogenados se comportan como los

naturales de bajo número de carbono, siendo normalmente la temperatura crítica algo más reducida. No obstante, los hidrocarburos halogenados presentan el problema de descomponerse por encima de una cierta temperatura, situada normalmente a partir de los 200°C. Otros fluidos interesantes son los aceites silícnicos o siloxanos, de propiedades similares a los hidrocarburos naturales de alto número de carbonos.

Tipología de ciclos ORC

En cuanto a tipología los ciclos pueden ser subcríticos o supercríticos, teniendo regenerador o no. La Figura 3 muestra un esquema de un ciclo con regenerador; que podría ser subcrítico o supercrítico (en el ciclo básico el regenerador no existe y la salida de la turbina se dirige a la entrada al condensador y la salida de la bomba a la entrada a la caldera de recuperación).

Los procesos en el ciclo básico son los mismos que en un ciclo de Rankine convencional, con la salvedad de que la salida de la turbina siempre será sobrecalentada. En cuanto a la introducción de la regeneración, en ORCs se realiza de forma diferente a los Rankine convencionales. En estos últimos el vapor para precalentar el agua de alimentación a la caldera se obtiene a partir de extracciones intermedias de

Figura 3. Esquema de un ciclo ORC con regenerador

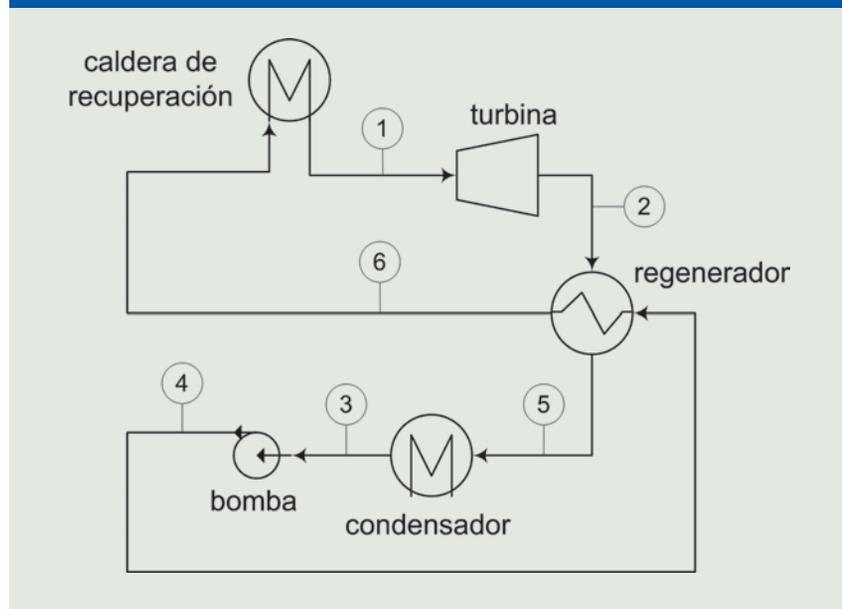
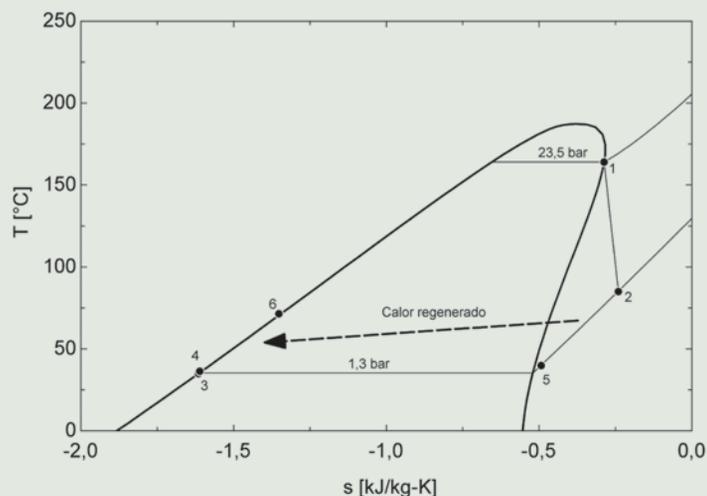


Figura 4. Esquema de un ciclo ORC subcrítico con regenerador realizado con isopentano



la turbina, no siendo este el caso en los ORC donde a menudo las turbinas presentan un solo escalonamiento. En su lugar se aprovecha el estado de vapor sobrecalentado a la salida de la turbina. La Figura 4 muestra el diagrama T-s de un ciclo subcrítico regenerado, donde se aprecia que a la salida de la turbina (2) hay una temperatura suficiente para precalentar el líquido impulsado por la bomba (4). Con esta opción se logra un rendimiento del 20,3% frente a un 17% en la versión del ciclo básico.

Al igual que en los ciclos combinados, la introducción de la regeneración siempre ha de buscar un equilibrio entre el incremento de la temperatura de entrada a la caldera de recuperación y el aprovechamiento de todo el potencial de calor contenido en la fuente de calor. En definitiva, se trata de producir el máximo trabajo posible a partir de un calor residual, no de diseñar un ciclo de máximo rendimiento.

En los ciclos supercríticos, de aplicación para recuperación de calores de alta temperatura, siempre suele resultar adecuada la regeneración debido a la elevada temperatura de salida de la turbina y a la elevada temperatura de salida de la fuente de la caldera de recuperación. En la Figura 5 se da el diagrama T-s de un ciclo supercrítico con isopentano para recuperar calor de unos gases a 300°C que se enfrían

hasta 130°C. El rendimiento del ciclo básico es del 18,1%, que se ve incrementado al introducir la cogeneración a un 26,2%.

Aspectos económicos

La cogeneración con ciclo de cola no está muy extendida en el sector industrial. Ello se debe tanto a aspectos técnicos como económicos. A nivel técnico, los ciclos de cola han de dimensionarse a medida para cada aplicación industrial, pudiendo ocurrir que las soluciones con vapor de agua no sean válidas en casos de baja potencia; a nivel económico los ciclos de cola aparecen recogidos en el RD

661/2007 en el grupo a.2 que dentro de la cogeneración (grupo a) es el que menores tarifas y primas recibe, junto con las cogeneraciones que emplean carbón y combustibles residuales (grupo a.1.4). Por otra parte, la actualización de las tarifas del grupo a.2 se realiza anualmente según el IPC.

El bajo nivel de subvención que reciben los ciclos de cola no hay que entenderlo como un desinterés de la Administración sino que es una consecuencia de los bajos costes que presentan este tipo de plantas. En efecto, al instalar un ciclo de cabeza el consumo de combustible puede llegar a duplicarse; por otra parte, el combustible representa aproximadamente un 80% de los gastos anuales del proyecto [7]. Sin embargo, un ciclo de cola no incrementa el consumo de combustible de la industria donde se instala, siendo sus gastos anuales derivados de la financiación de la inversión y del mantenimiento, normalmente reducido al tratarse de tecnología ORC. Por tanto, el reducido nivel de subvención está justificado atendiendo a la estructura económica del proyecto. Precisamente por esta baja subvención lo habitual en los ciclos de cola es que se utilicen en régimen de autoconsumo eléctrico, siempre que la demanda de la planta lo permita, pues las tarifas industriales superan ampliamente las tarifas de venta al Régimen Especial del grupo a.2 del RD 661/2007.

Fig. 5. Esquema de un ciclo ORC supercrítico con regenerador realizado con isopentano para una aplicación de alta temperatura

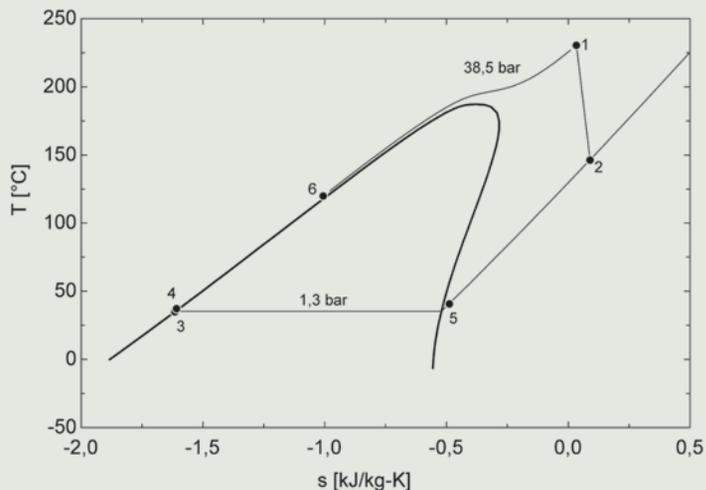


Tabla I . Comparativa de soluciones para el Caso Estudio

Fluido	Agua	Isopentano	Isopentano
Tipo de ciclo	Subcrítico	Subcrítico	Supercrítico
Presión caldera [bar]	4	23,5	38,5
Presión condensador [bar]	0,056	1,29	1,29
Potencia térmica recuperada [kW]	13.899	14.960	14.960
Temperatura salida humos [°C]	142	130	130
Potencia eléctrica neta [kW]	3.038	3.037	3.920

Esta particularidad resulta de elevado interés actualmente con la moratoria a la cogeneración establecida por el RDL 1/2012.

La inversión se puede estimar, para plantas ORC entre 2 y 5 MWe con calores residuales disponibles a 300°C [8], entre 1.900 a 2.500 €/kWe.

Caso estudio: industria cementera

Se considera una industria cementera que tiene una producción anual de 690.000 toneladas de clinker operando 8.070 horas al año. La demanda eléctrica es de 180 kJ/kg de clinker y dispone de un calor residual (referi-

do a 20°C) de 1.000 kJ/kg de clinker a 300°C. El calor residual está disponible en forma de gases de combustión que no pueden ser enfriados más allá de 130°C por problemas de condensaciones ácidas.

Con los datos anteriores resulta una potencia térmica disponible para el ciclo de cola de 14.960 kW. En la Tabla I se resumen los resultados obtenidos con la tecnología ORC frente a los logrados con la solución de Rankine convencional. Como se aprecia, el resultado en potencia eléctrica producida con el ciclo ORC subcrítico es muy similar al logrado con la solución convencional, logran-

do la solución de ORC supercrítico una mejora del 29%. En [9] puede encontrarse la implantación del ciclo supercrítico.

Conclusiones

Los ciclos ORC para cogeneración en ciclo de cola han despertado hoy día un elevado interés al ser especialmente adecuados para recuperar calores de media y baja temperatura, constituyendo así una forma eficaz de mejorar la eficiencia energética de la industria. La implementación de los ciclos ORC como ciclos de cola resulta flexible y abre muchas posibilidades para adaptarse a diferentes tipologías de oferta de calor; constituyendo una alternativa viable tanto técnica como económicamente hablando. En el contexto económico actual de fomento del autoconsumo y supresión del Régimen Especial resultan una alternativa competitiva y segura, al no incurrir en costes de combustibles adicionales. ■

Referencias

- [1] Corneille, H.P., Köln, S.H., *Organic Rankine cycles (ORC) for the conversion of waste heat and solar heat into mechanical energy*, LINDE. Reports on Science and Technology, 31, 38-46, 1980.
- [2] Lamb, J.P., *Performance characteristics of organic Rankine cycles*, International Journal of Ambient Energy, 5, 3-12, 1984.
- [3] Hung, T.C., Shai, T.Y., Wang, S.K., *A review of organic Rankine cycles (ORC) for the recovery of low-grade waste heat*, Energy, 22, 661-667, 1997.
- [4] Hettiarachchi, H.D.M., Golubovic, M., Worek, W.M., Ikegami, Y., *Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources*, Energy, 32, 1698-1706, 2007.
- [5] Vaja, I., Gambarotta, A., *Internal combustion engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs)*, Energy, 35, 1084-1093, 2010.
- [6] Desai, N.B., Bandyopadhyay, S., *Process integration of organic Rankine cycle*, Energy, 34, 1674-1686, 2009.
- [7] VVAA., *Guía de la Cogeneración. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid*, Madrid, 2010.
- [8] VVAA. 7th NCB International Seminar on Cement and Building Materials. New Delhi, 2000.
- [9] Aranda, D., Linares, J.I., Moratilla, B.Y., *Cogeneración con ciclo de cola en industria cementera*, Anales de Mecánica y Electricidad, 88, 29-33, 2011.

