La evolución eficiente del Ciclo Rankine

La industria energética está abocada a cambios periódicos tecnológicos y a seguir ofreciendo el mejor compromiso de eficiencia, fiabilidad y servicio. Ante hechos tan contundentes como el aumento del consumo eléctrico al doble en los últimos veinte años, y la más que probable continuación de tal tendencia en el futuro, es necesario seguir esforzándose en innovar y continuar aumentando la eficiencia en el uso y provecho de todas las fuentes de energía en los años venideros.

Francisco Javier Rubio, inventor de la tecnología

Las estrategias para minimizar el continuo encarecimiento de las fuentes tradicionales de energía se multiplica entre los diferentes países. En una economía que obedece a las necesidades del mercado, la industria ha usado su ambición natural de expansión para aportar soluciones innovadoras a las constricciones de la oferta. Esto ha llevado a invertir ininterrumpidamente en soluciones viables y alternativas, aumentando de ese modo la eficiencia, así como buscando nuevas fuentes de energía.

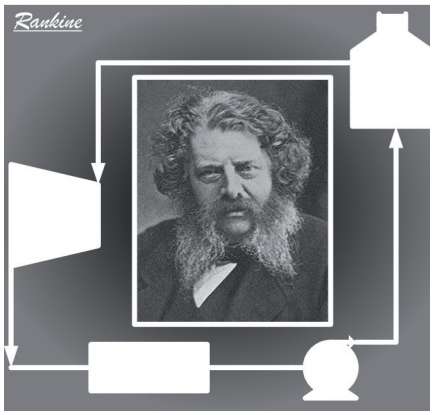
Entre las tecnologías clásicas, y de uso común en todas las plantas térmicas tradicionales y nucleares, está el ciclo Rankine o ciclo de vapor. El rendimiento de este ciclo se ha ido mejorado con el transcurso del tiempo, pero se propone aportar una mejora, no sólo en la eficiencia, sino en otras facetas de gran interés para la industria energética como es el ahorro del consumo de agua.

Se propone promover a través de este artículo una nueva tecnología para la mejora del ciclo, explicando sus ventajas y su gran potencial para las plantas energéticas actuales y futuras. Dicha tecnología está encabezada por IMASA, Ingeniería y Proyectos, S.A., multinacional española, que ostenta en exclusiva la misma proyectando múltiples aplicaciones, entre ellas, plantas de biomasa y, especialmente, en el campo solar termoeléctrico, donde ha acumulado conocimiento a lo largo de su trayectoria en el sector.

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico en el cual se transforma el calor en trabajo. Su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica del ciclo de Carnot operando entre dos focos térmicos. La principal ventaja de este ciclo es su madurez industrial, fruto de un largo y continuo desarrollo, así como a su elevada aplicabilidad. Las mejoras se producen principalmente por el aumento de la diferencia de temperatura entre el foco frío y el foco caliente, gracias a la continua evolución de los materiales, siendo capaces de sostener condiciones cada vez más restrictivas, llegando a soportar hasta condiciones supercríticas del agua. Los diseños térmicos y mecánicos más recientes han permitido diseñar condensadores de muy baja presión y turbinas de vapor a condensación para trabajar a presiones inferiores a 0,1 bar. Esto ha incrementado el rendimiento eléctrico del ciclo.

Otras ventajas han venido de un mejor aprovechamiento del calor en las calderas para sobrecalentar el vapor o recalentarlo, o utilizar varias corrientes de sangrado de la turbina para precalentar el agua de aporte a la caldera (regeneración). Para ampliar el aprovechamiento del calor de algunas plantas, se han introducido ciclos binarios, en donde operan dos ciclos en serie a diferentes temperaturas. En casos de bajas fuentes de calor, se puede emplear un fluido orgánico para aprovecharlo mejor (ciclos de Rankine orgánicos). Por medio de herramientas modernas de CFD, se han elaborado turbinas y equipos más sofisticados, con rendimientos aumentados y menor mantenimiento.

Sin embargo, en la actualidad, la disponibilidad de agua y el uso de torres de refrigeración están siendo un cuello de botella con los que se está encontrando los ciclos de Rankine actuales. El agua es cada vez un bien más caro y escaso. Sirva de referencia que ubicaciones idóneas para plantas solares termoeléctricas, con elevado grado de insolación anual, están encontrando barreras por la limitación de agua en la zona. Estas circunstancias juegan en detrimento de la producción eléctrica, ya que obliga a una mayor presión de condensación. Es ineludible pues que estos factores



pueden llegar a penalizar el rendimiento y, como consecuencia, el éxito del proyecto. Y aún cuando la disponibilidad de agua es asequible, el empleo de torres de refrigeración trae consigo un aumento de los costes de explotación, tratamiento del agua (consumo de aditivos químicos) y riesgos medioambientales (como es el problema cada vez más presente de la legionella) que dificultan o inclusive hacen inviables la instalación de estos ciclos utilizando refrigeración por vía húmeda. Aunque los aerocondensadores (condensación del vapor de agua mediante contacto indirecto con aire ambiente), a priori, permiten solucionar en parte el problema, tanto su precio como el espacio requerido y su consumo eléctrico hacen que su instalación no sea rentable ni atractiva en la mayoría de los casos.

En los problemas comentados anteriormente es donde realmente hay espacio para mejora, ya que un equipo español de investigadores, liderado por Francisco Javier Rubio, jefe de ingeniería de la división de energía de IMASA, Ingeniería y Proyectos, S.A., ha llegado a una solución simple y con múltiples ventajas en cuanto a espacio, costes de operación y mantenimiento, rendimiento, y coste de inversión. Se trata del ciclo Higroscópico. Esta evolución del ciclo Rankine permite trabajar con compuestos higroscópicos que contribuyen a mejorar las condiciones de condensación del vapor a la salida de la turbina y reducir muy significativamente el consumo de agua.

El ciclo Higroscópico utiliza los principios físicos y químicos de las máquinas de absorción para aportar al ciclo Rankine mayor rendimiento y mejores condiciones de refrigeración en un sistema eficiente y práctico. El conocimiento y experiencia con compuestos higroscópicos ha sido la motivación de esta idea, y especialistas a nivel internacional de institutos de energía de primer nivel así lo avalan.

Los compuestos higroscópicos son compuestos que presentan una gran avidez por el agua en forma de vapor. Generalmente son sales (LiBr, NaCl, Na2SO4 por citar algunos ejemplos) presentes algunas de ellas en bajas concentraciones en el agua de red. Se trata de compuestos que no son volátiles, tóxicos ni inflamables, sino estables, abundantes y baratos. Dependiendo de su naturaleza y concentración, todos ellos tienen en común que, en mayor o menor medida, sus disoluciones con el agua permiten aumentar las temperaturas de condensación. El ejemplo más sencillo lo encontramos en el aumento ebulloscópico que sufre el agua cuando lo mezclamos con pequeñas cantidades de sal común.

Por medio de la absorción con compuestos higroscópicos, a diferencia del ciclo Rankine, se pueden conseguir menores presiones a la salida de la turbina para la misma temperatura de refrigeración, o condensar a mayor temperatura para las mismas presiones de condensación. Además, la elección de compuestos higroscópicos con calores de dilución endotérmicos (KNO3 y NaNO3 por ejemplo) disminuye parte de la energía de condensación en el absorbedor. Para aprovechar este efecto al máximo y disminuir el consumo de agua, este simple y eficaz ciclo disipa el resto de la energía mediante un aerorrefrigerante. La configuración del ciclo Higroscópico es tal que de manera ingeniosa y práctica se reemplaza el condensador tradicional o un aerocondensador, por un absorbedor donde se ponen en contacto las sales higroscópicas con el vapor de salida de turbina que se pretende condensar. La configuración del ciclo empleando un absorbedor como condensador tiene numerosas ventajas sobre un condensador tradicional. La primera es el precio, ya que puede llegar a ser hasta 5 veces más barato que un condensador tradicional, ocupa mucho menos espacio (reducción de costes de obra civil), la pérdida de carga es prácticamente nula (menos necesidad de subenfriar el vapor) y los costes de explotación son también significativamente inferiores.

"La principal ventaja de este ciclo es su madurez industrial, fruto de un largo y continuo desarrollo, así como a su elevada aplicabilidad".

Según la concentración del compuesto higroscópico elegido se obtendrá mayor o menor rendimiento, puesto que se podrá trabajar con presiones de condensación más bajas sin que las condiciones

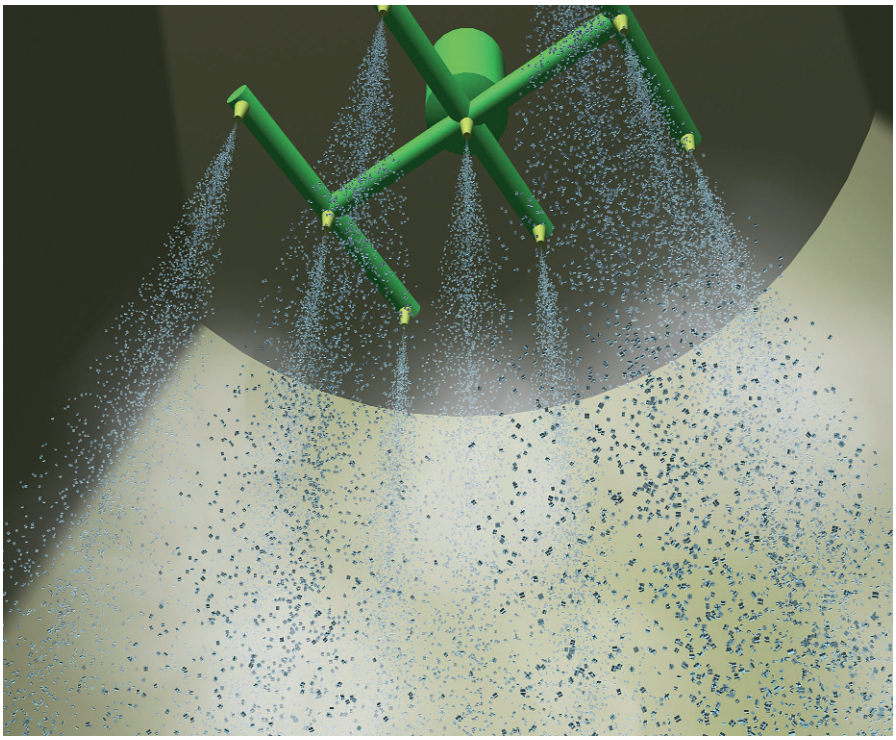
medioambientales limiten el foco frío. Esta optimización se traduce en producciones eléctricas entre un 1% y un 5% mayores que los actuales ciclos Rankine operando a las mismas condiciones en el foco caliente y bajo las mismas condiciones ambientales (foco frío). Se trata por tanto de un paso muy significativo en la evolución e implantación de los ciclos Rankine.

El ciclo higroscópico cuenta con varias similitudes al ciclo Rankine pero, sobre todo, de entre todas, cabe destacar el hecho de poder aplicar las mismas mejoras que en el ciclo convencional. Esto permite obtener aún más rendimiento a este último, gracias a las mejores condiciones de refrigeración, condiciones que vienen marcadas por el uso de los distintos compuestos higroscópicos. Tal familia en la actualidad, es motivo de intensos estudios, los cuales están dando sus frutos, obteniendo como consecuencia una constante expansión en número de compuestos y en el conocimiento de sus propiedades. El ciclo Higroscópico de ello se ve y verá beneficiado a medida que el conocimiento avance.

Con frecuencia, en ingeniería sucede que los aumentos de eficiencia conllevan un mayor coste de los equipos, debido mayormente a los mejores materiales y la tecnología empleada en su fabricación. Sin embargo, en comparación a los actuales ciclos Rankine, se puede afirmar que para bajas concentraciones de sal o compuesto higroscópico se consigue un 1% más de producción eléctrica, se reduce en más de un 90% el consumo de agua de la planta, se disminuyen los costes de explotación, y todo esto con una inversión inicial de la planta similar o menor, dado que se utilizan equipos convencionales, comerciales y garantizados por el fabricante.

> "El ciclo Higroscópico utiliza los principios físicos y químicos de las máquinas de absorción para aportar al ciclo Rankine mayor rendimiento y mejores condiciones de refrigeración en un sistema eficiente y práctico. El conocimiento y experiencia con compuestos higroscópicos ha sido la motivación de esta idea, y especialistas a nivel internacional de institutos de energía de primer nivel así lo avalan".

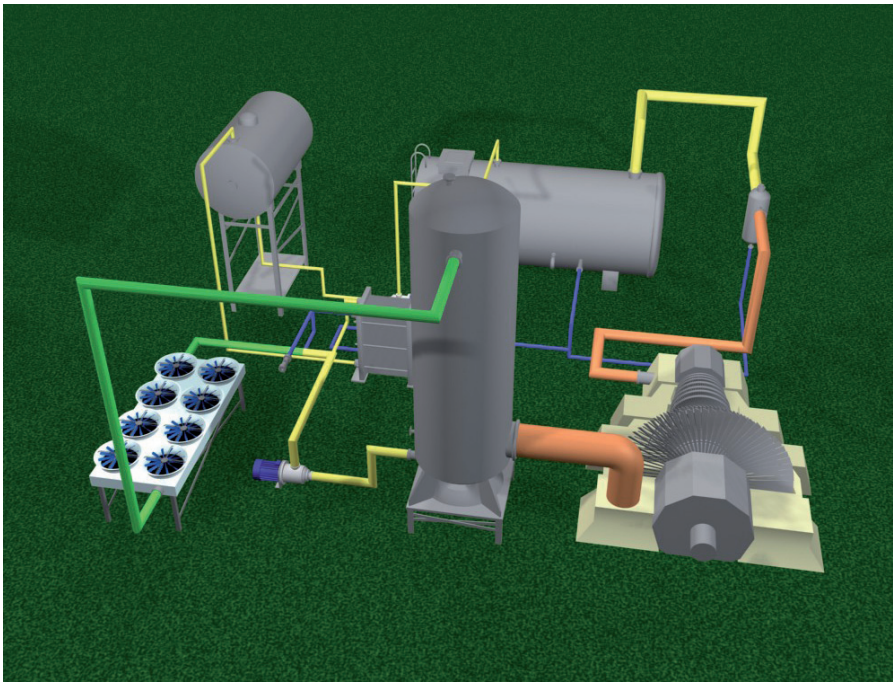
Ciertamente una mayor concentración de sales implica mayor coste de los equipos, pero el aumento de eficiencia del ciclo compensa ampliamente tal incremento, reduciéndose así el tramo a amortizar.

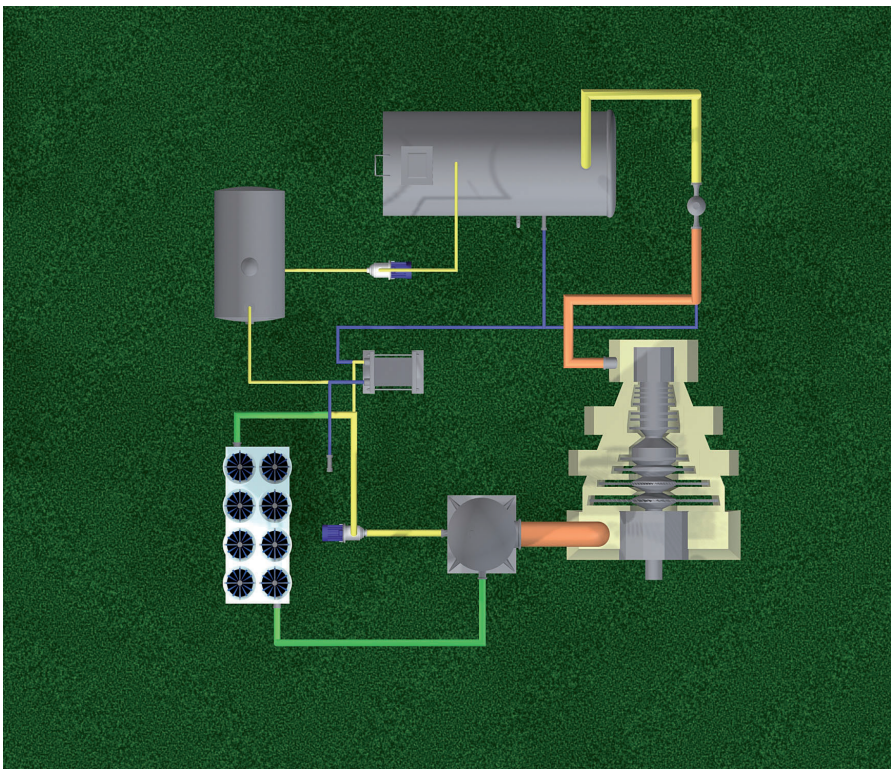


Este punto es clave a la hora de comercializar el ciclo, ya que, para inversiones similares, el ciclo Higroscópico es más competitivo, rentable y con la misma fiabilidad y garantía que los ciclos Rankine tradicionales.

Esta tecnología es de aplicación inmediata en ciclos combinados, plantas solares termoeléctricas, plantas nucleares y plantas de combustión por biomasa, carbón, etc… Incluso al aumentar la temperatura de condensación se puede utilizar en plantas de cogeneración para aprovechamiento térmico, aumentando su campo de acción y potencial futuro.

Empleando un ejemplo real de inversión reciente, se puede comparar su rendimiento con el ciclo Higroscópico para demostrar la potencialidad del mismo a la hora de competir entre proyectos energéticos. El referente es una sofisticada planta de producción eléctrica por combustión de biomasa de 15 MWe de reciente instalación. Ésta garantiza una disponibilidad del 86 %, 7.500 h/año, y un rendimiento eléctrico neto del 27% utilizando un ciclo optimizado de Rankine tradicional. Uno de los problemas con los que se encuentra esta planta es la escasez de agua en los alrededores y las continuas inspecciones sanitarias por el problema de la legionella. Por lo tanto, en ausencia de agua, la presión de condensación del vapor a la salida de la turbina está limitada, y con ello el rendimiento del ciclo. El ciclo Higroscópico que comercialmente podría instalarse en la actualidad tiene el potencial de liberar el ciclo de este límite y aumentar su rendimiento a un coste inferior. En primer lugar el ciclo Higroscópico no requiere torres de refrigeración ni aerocondensadores, sino un aerorrefrigerante por el que se disipa el calor de condensación del vapor originado en el absorbedor. Se estima de manera conservadora que el precio total de la inversión de este ciclo está en torno a un 5% menos que el actual ciclo Rankine. Se puede incluso garantizar un incremento neto de un 1% en la producción eléctrica, lo que corresponde en este caso a 150 kW netos más,





dado que los autoconsumos no aumentan con este ciclo. En cuanto al ahorro anual de agua y aditivos para esta planta, se estima en 400.000 m3 el consumo de agua en las torres de refrigeración, y más de 10 m3 en aditivos químicos (NaClO, biocida y antiincrustante) al año. En comparación, el consumo de agua anual de esta planta es el equivalente a llenar 160 piscinas olímpicas, y podría abastecer a más de 7.000 personas en un año para un consumo normal diario de agua de 150 litros por persona.

Además, con el paso del tiempo, el coste del agua industrial irá en aumento, y para el año 2014 se prevé un coste medio de 2 €/m3. Aplicando estas cifras se llega al valor de 800.000 € ahorrados al año sólo en agua de reposición. Después hay que considerar el coste de los aditivos químicos, el mantenimiento de las torres, el impacto medioambiental etc…

Por otro lado se encuentra el beneficio económico del ciclo originado por la mayor producción eléctrica neta que se alcanza con esta nueva tecnología, en este caso de 1.125 MWh/año, que supone un ingreso anual de 135.000 € aproximadamente.

Por tanto se puede concluir que, para este ejemplo de planta eléctrica por combustión de biomasa, el emplear el ciclo Higroscópico en vez de un ciclo Rankine tradicional daría 1 millón de euros de beneficio netos más al año, calculado de manera conservadora y, recordemos, partiendo de una menor inversión.

Cabe destacar que en plantas solares termoeléctricas estos valores de beneficio son ligeramente superiores, pues generalmente la mejor ubicación de la planta corresponde a zonas desérticas donde la ausencia de agua es el principal problema.

Estos valores reflejan la competitividad de la inversión en el ciclo Higroscópico, y el equipo de expertos responsables de esta novedosa tecnología está dispuesto a afrontar cualquier desafío para aplicar este ciclo a la industria, gracias a su talento, experiencia y motivación para ofrecer la mejor solución técnica, económica, segura y medioambiental a sus clientes.

> "Esta tecnología es de aplicación inmediata en ciclos combinados, plantas solares termoeléctricas, plantas nucleares y plantas de combustión por biomasa, carbón, etc… Incluso al aumentar la temperatura de condensación se puede utilizar en plantas de cogeneración para aprovechamiento térmico, aumentando su campo de acción y potencial futuro".

Inventor de la tecnología:
Francisco Javier Rubio Serrano
Jefe de ingeniería de la división de energía de IMASA, Ingeniería y Proyectos, S.A.
www.imasa.com

Artículo realizado por:
Grupo de investigación Ibergy
www.ibergy.com