

Ciclo Higroscópico: la evolución eficiente del ciclo Rankine

La industria energética ha sido la llave para la innovación de los mayores proyectos de este mundo. Desde Edison hasta nuestros días, la mayor motivación de la industria y de las grandes mentes ha sido poder llevar una fuente segura y fiable de energía a la mayor parte posible de la población. Con el tiempo han ido surgiendo cambios e innovaciones que han permitido pasar etapas e hitos en la humanidad, como la reciente llegada de la persona número 7.000 millones a nuestro planeta. Esto no hubiera sido posible sin la constante mejora necesaria para abastecer a este creciente número de habitantes, y demuestra que todos los esfuerzos en innovación y aumento de la eficiencia en el uso y provecho de todas las fuentes son un camino a seguir en los años venideros. El presente artículo presenta nueva tecnología para la mejora del ciclo Rankine, explicando sus ventajas y su gran potencial para las plantas energéticas actuales y futuras

Francisco Javier Rubio Serrano, Jefe de Ingeniería de la División de Energía de IMASA

Una de las mayores preocupaciones de las antiguas y nuevas naciones es cómo afrontar el continuo encarecimiento de las fuentes tradicionales de energía. En una economía de mercado, la industria ha remado para aportar soluciones innovadoras a las constricciones de la oferta. Esto ha llevado a invertir intensamente para dar con soluciones viables y alternativas, aumentando de ese modo la eficiencia, así como buscando nuevas fuentes de energía. Se puede estimar con bastante acierto el futuro consumo de energía de la población mundial, pero es difícil calificar y cuantificar sus fuentes.

Según las mejores estimaciones, una gran parte vendrá de la transformación de la energía solar en eléctrica, y el uso de otras fuentes renovables. Sin embargo, estas fuentes dependen aun de la disponibilidad y estacionalidad durante las que se pueden utilizar. La solución ha sido unir tecnologías antiguas con modernas, para paliar estas graves carencias.

Entre las antiguas tecnologías, 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 ha sido mejorado notablemente en los últimos 100 años, pero se propone aportar una mejora, no sólo en la eficiencia, sino en otros temas de gran interés para la industria energética.

El objetivo de este artículo es promover una nueva tecnología para la mejora del ciclo, explicando sus ventajas y su gran potencial para las plantas energéticas actuales y futuras. Dicha tecnología viene de la mano de IMASA, INGENIERÍA Y PROYECTOS, S.A., multinacional española de ingeniería y proyectos, que ostenta en exclusiva la misma y está proyectando múltiples aplicaciones, como su uso en plantas de biomasa y, especialmente, en el campo solar termoeléctrico, gracias al conocimiento acumulado en su larga trayectoria en el sector.

El ciclo Rankine: Rendimiento acotado por la disponibilidad de agua

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico cuyo objetivo es la transformación del calor en trabajo. Como es conocido en la industria energética, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un 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 su elevada aplicabilidad.

Las mejoras se han producido mayoritariamente por el aumento de la diferencia de temperatura entre el foco frío y el foco caliente, derivadas de la evolución de los materiales para ser capaces de sostener condiciones cada vez más restrictivas, llegando a



soportar hasta condiciones supercríticas del agua. También, gracias a la mejora de diseños térmicos y mecánicos, se han podido diseñar condensadores de muy baja presión y turbinas de vapor a condensación para trabajar a presiones inferiores a 0,1 bar. Esto ha contribuido a incrementar 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 una corriente de sangrado de la turbina para precalentar el agua de aporte a la caldera (regeneración). En algunos casos se han introducido ciclos binarios, en donde operan dos ciclos en serie a diferentes temperaturas, así como ciclos orgánicos de Rankine, los cuales, en vez de utilizar agua, emplean un fluido orgánico. Otras mejoras más recientes han sido la utilización de herramientas modernas de CFD para elaborar turbinas y equipos más sofisticados, con mayor rendimiento y menor mantenimiento.

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 Rankine actuales. El agua es cada vez un bien más caro y escaso. Sirva de referencia que ubicaciones idóneas para plantas eléctricas termosolares, 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.

El ciclo higroscópico: mejoras de rendimiento y condiciones de refrigeración

En la solución a todos los problemas comentados anteriormente es donde realmente se puede encontrar espacio para mejora, de hecho, un equipo español de investigadores, liderado por Francisco Javier Rubio, jefe de ingeniería de la división de energía de IMASA, 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 innovadora 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.

El ciclo higroscópico utiliza los principios físicos y químicos de las máquinas de ab-



© Kristian Niemi

Compuestos higroscópicos.

sorción 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 de rango internacional de institutos de energía de primer nivel así lo avalan.

Los compuestos higroscópicos son compuestos que presentan una gran avidedad por el agua en forma de vapor. Generalmente son sales (LiBr, NaCl, Na_2SO_4 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 (KNO_3 y NaNO_3 por ejemplo) disminuye parte de la energía de condensación en el absorbente. 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 absorbente 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 absorbente 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

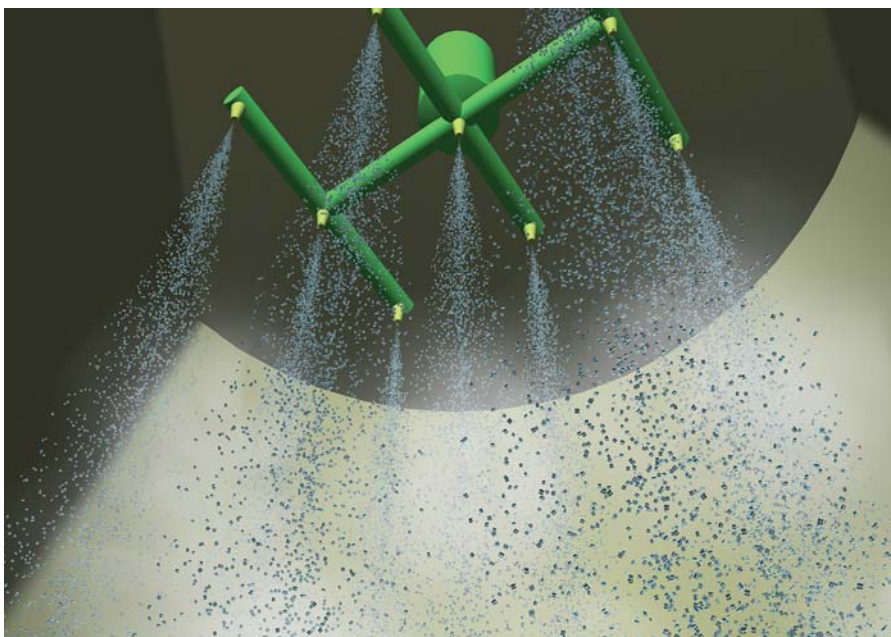


Foto del interior de un absorbente de vapor extraída de nuestros modelos en 3D.

es prácticamente nula (menos necesidad de subenfriar el vapor) y los costes de explotación son también significativamente inferiores.

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 se ve y verá beneficiado de ello a medida que el conocimiento avanza.

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.

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.

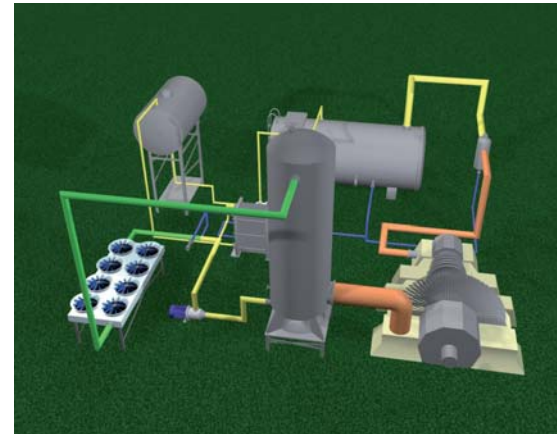
Esta tecnología es de aplicación inmediata en ciclos combinados, plantas solares termoeléctricas, plantas nucleares y plantas de combustión por biomasa, carbón, etc... Incluso al aumentar la temperatura de condensación se puede utilizar en plantas de cogeneración para aprovechamiento térmico, aumentando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

Caso real: ciclo higroscópico en una planta de biomasa de 15 MW

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 aercondensadores, sino un aerorefrigerante 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 ac-



tual ciclo Rankine. Se consigue 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.

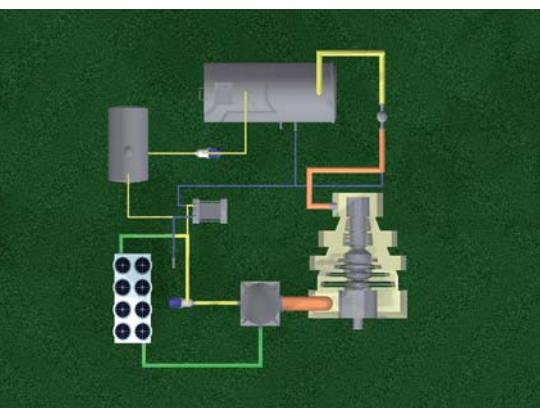
En cuanto al ahorro anual de agua y aditivos para esta planta, se estima en 400.000 m³ el consumo de agua en las torres de refrigeración, y más de 10 m³ en aditivos químicos (NaClO, biocida y antiincrustante) al año. En comparación, el consumo de agua anual de esta planta es el equivalente a llenar 160 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 2013 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 M€ de beneficio netos más al año, calculado de manera conservadora y, recordemos, partiendo de una menor inversión.

Cabe destacar que en plantas eléctricas termosolares 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.



Vista superior del ciclo Higroscópico extraída de nuestros modelos en 3D.