

ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE UN CICLO COMBINADO CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO Y CICLO DE KALINA

Autor: Lago Quintáns, Manuel.

Director: Linares Hurtado, José Ignacio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se evalúa, tanto técnica como económicamente, la integración de un motor alternativo de gas en un ciclo combinado. El relativamente bajo nivel térmico de los humos de escape (400 a 500°C) dificulta en gran medida el empleo de un ciclo de Rankine, por lo que se plantea como objetivo del proyecto llevar a cabo la evaluación empleando un ciclo del Kalina, que según la bibliografía técnica resulta mucho más adecuado a estos niveles térmicos.

El ciclo de Kalina es una variante del ciclo de Rankine que se realiza con una mezcla binaria amoníaco/agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) que presenta un comportamiento zeotrópico. Este comportamiento permite que los procesos de cambio de fase realizados a presión constante no ocurran a temperatura constante, sino que se desarrollen en un intervalo de temperaturas que depende de la presión y la composición de la mezcla. Esta cualidad permitirá realizar un mejor seguimiento del perfil de temperatura de los gases de escape, reduciendo las pérdidas energéticas en la caldera de recuperación (HRSG) con respecto a un ciclo de Rankine tradicional.

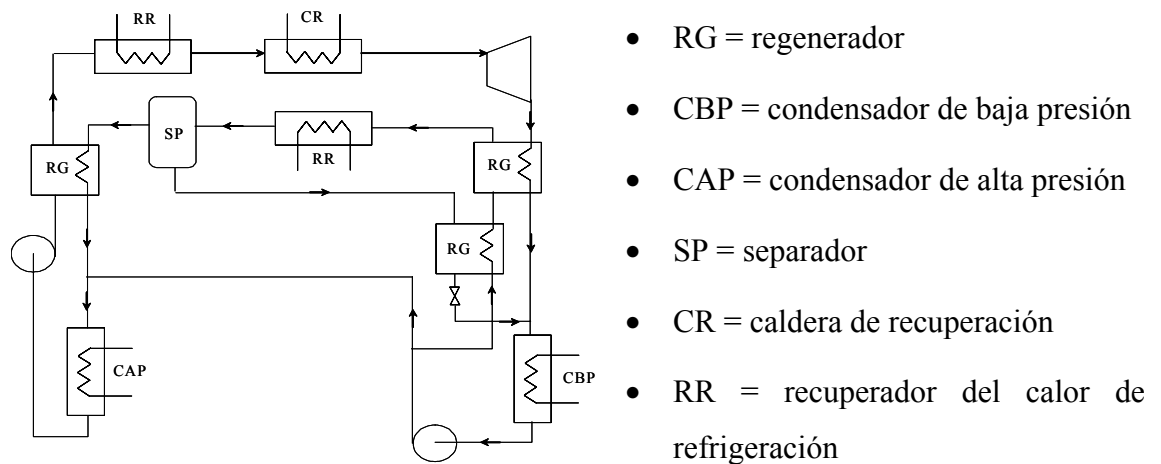
El proyecto no se limita a resolver un escenario concreto, sino que crea un abanico de posibilidades de funcionamiento del ciclo, analizando las influencias de determinadas variables en los resultados.

El motor de gas se ha parametrizado a partir de una base de datos de 67 motores de 10 fabricantes distintos, cuyas potencias oscilan entre 100 kW y 5500 kW. Así, se han modelado las prestaciones energéticas de dichos motores en función de la potencia eléctrica.

El modelo del ciclo de Kalina se ha implantado en el entorno EES (Engineering Equation Solver, www.fchart.com), que permite el tratamiento de propiedades térmicas

de la mezcla $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, así como la resolución de sistemas no lineales y la elaboración de gráficas.

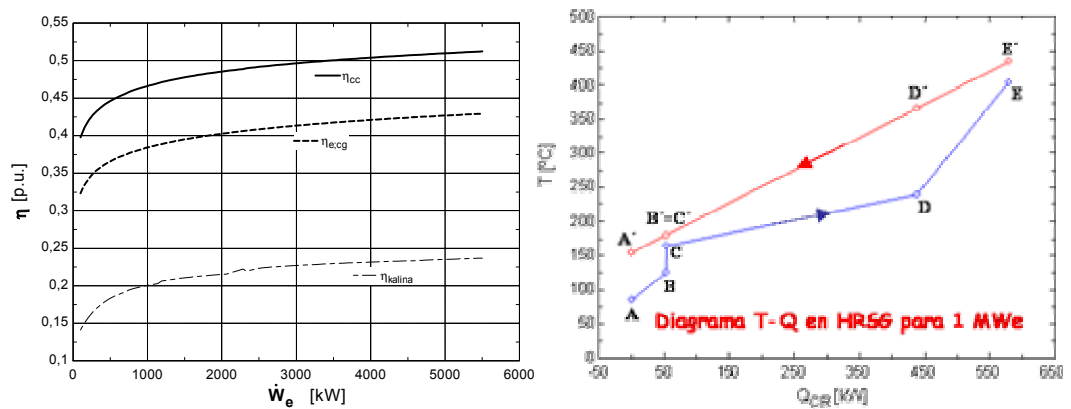
Se han ido estableciendo modelos previos con el fin de obtener un modelo robusto, apto para el funcionamiento en todos los casos estudiados. El modelo finalmente adoptado incorpora un separador que reduce la concentración de amoníaco en el condensador de baja presión, para así disminuir el deslizamiento (pendiente del diagrama T-Q) y la temperatura media de cesión de calor, afectando positivamente al rendimiento. Se han incluido también tres regeneradores (para reducir al máximo las irreversibilidades) y dos recuperadores de calor del circuito de refrigeración de las camisas de los cilindros, de modo que se puedan aprovechar las características del $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ para recuperar dicho calor gratuito de baja temperatura (110°C aproximadamente). El esquema en planta del modelo sería el siguiente.



Dicho modelo se ha desarrollado con cuatro variables: la eficiencia de los regeneradores, el ratio de presiones (cociente entre la presión en el separador y la presión a salida de turbina), la presión en la caldera y la potencia eléctrica. La eficiencia de los regeneradores y el ratio de presiones han sido optimizados en función de la potencia, mientras que la presión en caldera y la potencia constituirán un abanico de modos de funcionamiento del modelo. Para realizar comparativas con modelos de Rankine la presión en caldera vendrá dada por la temperatura del punto de estricción, denominando así a la temperatura del gas en el momento en que la mezcla binaria pasa por el punto de líquido saturado en la HRSG.

Este modelo ha logrado mejoras en los rendimientos de entre 7 y 8 puntos con respecto al motor de gas aislado, superando considerablemente a tres modelos diferentes del

ciclo de Rankine diseñados con el mismo fin. Además, el ciclo es capaz de funcionar en todo el rango propuesto: desde 100 hasta 5500 kW, y desde 104 hasta 245 bar en caldera, lo que no ocurre con los ciclos de Rankine analizados. A continuación se muestra, a modo de ejemplo, una comparativa de los rendimientos del motor de gas aislado con los del ciclo combinado para una temperatura del punto de estricción de 220°C; la misma gráfica contiene el rendimiento interno del ciclo de Kalina, que resulta irrelevante por la gratuidad del calor empleado en él. También se muestra un diagrama T-Q de la caldera, donde se puede observar el comportamiento zeotrópico del NH₃/H₂O.



En cuanto a aspectos económicos, la inversión inicial para generar la misma potencia resulta bastante mayor para el ciclo combinado, pero su coste de generación del kWh es aproximadamente un 14% menor que el del motor de gas aislado, provocando un incremento de los beneficios anuales cercano al 35%. Aun así, el periodo de retorno de la inversión es algo inferior para los motores de gas aislados, por lo que el ciclo combinado se perfila como una alternativa más rentable pero más arriesgada.

El empleo del ciclo combinado aporta también ventajas medioambientales: se han calculado unas emisiones de CO₂ del motor de gas de aproximadamente 480 g/kWh, mientras que las del ciclo combinado serían de 408 g/kWh. Esto supone un ahorro del 15% de las emisiones por kWh generado, aspecto que podría considerarse en el estudio económico si se incluyese en él el comercio de derechos de emisión.

Los resultados son prometedores, pero la integración de los motores de combustión interna alternativos queda abierta a más estudios, que podrían analizar nuevas variables (la concentración de amoníaco, por ejemplo), considerar otros esquemas del ciclo de Kalina, o buscar una tecnología alternativa, como puede ser el ciclo de Rankine orgánico.