

# ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE UN CICLO COMBINADO CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO Y CICLO DE RANKINE ORGÁNICO.

**Autor: Mendoza Larive, Alejandro**

Director: Linares Hurtado, José Ignacio; Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

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 °C a 500 °C) y del agua de refrigeración (90 °C a 110 °C) hacen del empleo de fluidos orgánicos una buena opción. Los fluidos orgánicos presentan como ventajas poder emplear equipos compactos debido a que tienen un salto entálpico por unidad de volumen alto y no es necesario sobrecalentar, puesto que el estado del fluido tras la expansión en la turbina no es de vapor húmedo. Por otra parte, con la adecuada selección del fluido no se requiere la presencia del desgasificador, al poder condensar a presiones superiores al ambiente.

En el proyecto se evalúan diferentes escenarios en función de la potencia del motor, el acercamiento en la caldera del amoniaco y las temperaturas de los fluidos que aprovechan los humos procedentes de la combustión.

El motor de gas se ha parametrizado a partir de una bases de datos de 67 motores de 10 fabricantes distintos, cuyas potencias oscilan entre 100 kW y 5500kW. Así, se han modelado las prestaciones energéticas de dichos motores en función de la potencia eléctrica entregada por ellos. En el caso de los ciclos de Rankine orgánico se ha recurrido a un modelado físico.

El aprovechamiento de los calores residuales se lleva a cabo en los humos de escape mediante un ciclo en cascada ciclohexano-amoniaco. El aprovechamiento del calor de refrigeración del bloque se realiza mediante un ciclo regenerativo con FC87 (C<sub>5</sub>F<sub>12</sub>).

Los resultados técnicos revelan un incremento de la potencia eléctrica entre el 27 % para el motor de 100 kWe y el 18% para el de 5000 kWe. Estos incrementos

suponen un rendimiento del ciclo combinado de 40% para el motor de 100 kWe y de 50 % para el de 5000 kWe.

De la parte económica cabe destacar la reducción de los periodos de retorno al incluir el ciclo de Rankine orgánico así como un aumento tanto del VAN como de la TIR, tal como se muestra en la Figura 1. Esto significa que el “repowering” de un motor aislado mediante este sistema de aprovechamiento de calores de baja temperatura permite incrementar la rentabilidad, facilitando la viabilidad económica de unidades más pequeñas (un motor aislado de 1500 kW presenta un período de retorno de 21 años, mientras que con el acoplamiento al sistema orgánico el período de la inversión conjunta se reduce a 14 años, incrementándose el VAN en más de 1 M€).

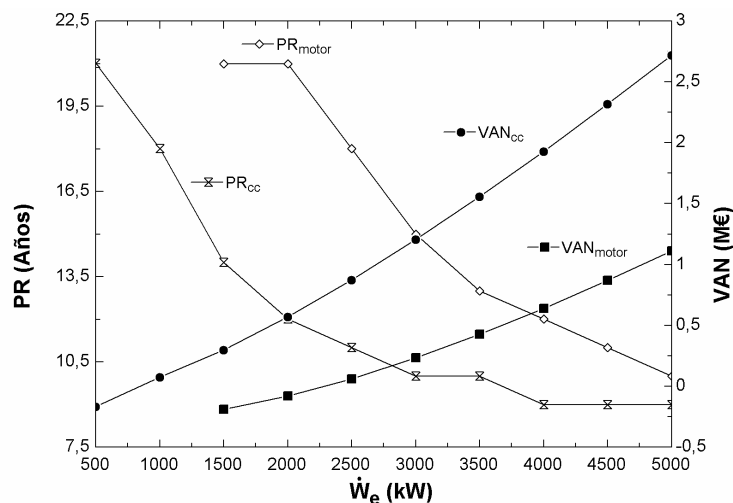


Fig. 1.- VAN y PR del motor aislado y ciclo combinado.

En cuanto a los costes anuales equivalente totales de producción (incluida la inversión), son casi un 10% más bajos en el ciclo combinado que en el motor aislado (para un motor de 5 MWe). El coste de generación en el ciclo combinado es de 65 €/MWh, correspondiendo un 69% al combustible, un 19% a la inversión y 12% a la operación y mantenimiento (motor de 5 MWe). Estos costes se sitúan por debajo del precio de venta de electricidad anual equivalente (77 €/MWh) para motores de más de 1000 kWe, mientras que en el caso del motor aislado se requerían tamaños de más de 2500 kWe.

La figura 2 muestra las emisiones de  $CO_2$  del motor aislado frente al ciclo combinado propuesto. El incremento logrado en el rendimiento hace que las emisiones específicas se reduzcan entre 79 g/kWhe y 69 g/kWhe lo que en términos relativos es de entre 16 % y el 15 %. El valor obtenido en las emisiones del ciclo combinado propuesto es similar al que logran los ciclos combinados convencionales Brayton-Rankine.

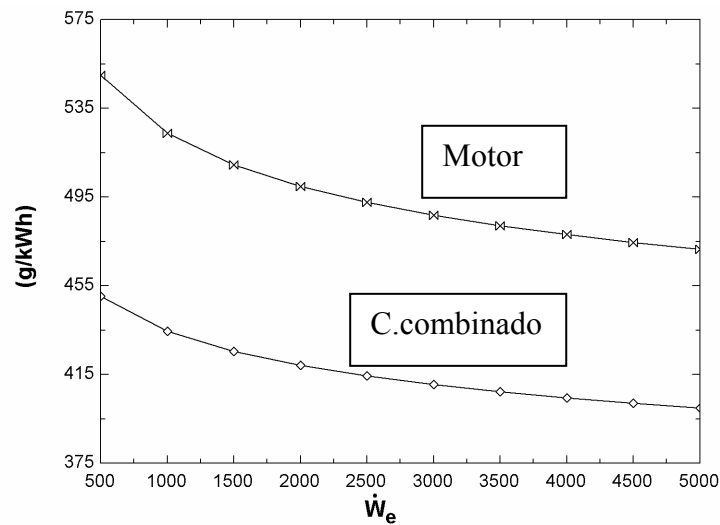


Fig. 2.- Emisiones de  $CO_2$ .

Si se compara el empleo del motor en cogeneración con el del ciclo combinado se encuentra un mejor aprovechamiento en el sistema de cogeneración. Así, aunque el rendimiento eléctrico artificial es similar en ambas configuraciones para motores de 100 kWe, en motores de 5 MWe supera el 58% en cogeneración, alcanzando sólo el 50% en ciclo combinado. Si se compara el índice de ahorro de energía primaria siempre resulta más eficiente la cogeneración que el ciclo combinado, siendo el ahorro del 38% en el primero y del 30% en el segundo para un motor de 5 MWe.

Como conclusión, se ha probado que la constitución de un ciclo combinado motor de gas-Rankine orgánico es técnica y económicamente posible, mejorando la rentabilidad de la producción eléctrica del motor de gas, aunque no siendo tan eficiente como el empleo del motor en cogeneración. Dado que la inversión adicional en el ciclo de Rankine orgánico no es excesiva puede pensarse en un sistema híbrido, que alterna entre la producción eléctrica intensificada (ciclo combinado) o la producción de calor y electricidad, en función de la demanda.

# TECHNICAL - ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS OF A COMBINED CYCLE WITH INTERNAL COMBUSTION ENGINE AND ORGANIC RANKINE CYCLE

**Author: Mendoza Larive, Alejandro**

Director: Linares Hurtado, José Ignacio; Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas de Madrid

## SUMMARY PROJECT

In this project it is assessed, technological and economically, the integration of a natural gas internal combustion engine in a combined cycle. Due to the relatively low thermal level of the flue gases at the exhaust pipe (400 °C to 500 °C) and of the cooling water (90 °C 100 °C), the employment of organic fluids is a good option. The organic fluids allow the use of compact equipments due to the fact that they have high enthalpy jump per unit of volume and superheating is not necessary because the condition of the fluid downstream the expansion in the turbine is not of humid steam. On the other hand, with the suitable selection of the fluid its condensation pressure is above the environmental pressure.

In the project different scenes are evaluated depending on the power of the engine, the pinch point of the boiler of ammonia and the temperatures of the fluids that absorb the heat from the combustion gases.

The gas engine characteristics there are obtained from a databases of 67 engines of 10 different manufacturers, whose powers range are between 100 kW and 5500kW. This way, they have been modelled depending on the electrical power delivered by them.

The organic Rankine cycle has been modelled physically. The utilization of waste heats from the exhaust pipe has been modelled with a cascade cycle of cyclohexane and ammonia and utilization of the refrigeration heat employ FC87 (C<sub>5</sub>F<sub>12</sub>).

The technical results reveal an increase of the electrical power between 27 % for the engine of 100 kWe and 18 % for of 5000 kWe. These increases suppose a performance of the combined cycle of 40 % for the engine of 100 kWe and of 50 % for the engine of 5000 kWe. In the economic part it is necessary to distinguish the reduction of return periods if the organic Rankine cycle is included, and also an

increase of the VAN (Net Present Value) and TIR (Internal Rate of Return), as it appears in Figure 1. This means that the re-powering of an engine isolated using an organic Rankine cycle allows to increase the profitability, facilitating the economic viability of the smallest units (an engine isolated of 1500 kW presents a return period of 21 years, whereas with the combined cycle the period of the investment reduces to 14 years, increasing its VAN in more than 1 M €).

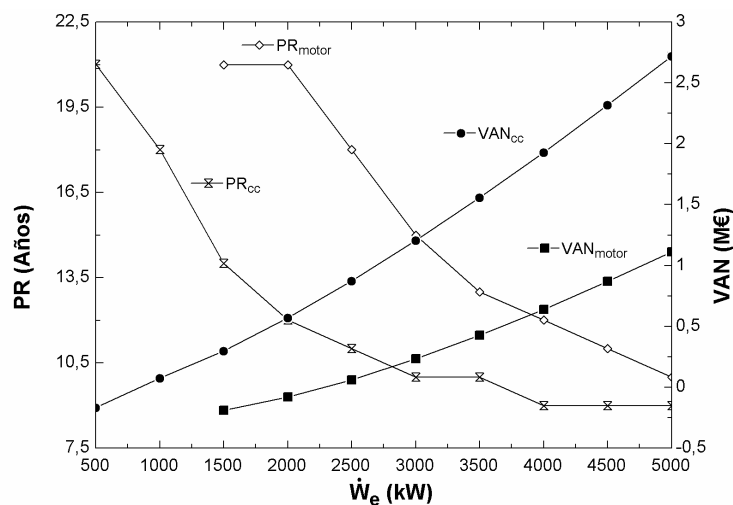


Fig. 1.- VAN y RP of the isolated engine and combined cycle.

In reference to the overall levelized costs of production (included the investment), they are almost 10 % lower in the combined cycle than in the isolated engine (for an engine of 5 MWe). The cost of generation in the combined cycle is 65 €/MWh, corresponding 69 % to the fuel, 19 % to the investment and 12 % to the operation and maintenance (engine of 5 MWe). These costs are placed below the levelized price of electricity (77 €/MWh) for engines of more than 1000 kW<sub>e</sub>, whereas in case of the isolated engine sizes were needed of more than 2500 kW<sub>e</sub>.

Figure 2 shows the CO<sub>2</sub> emission of the engine isolated in contrast to the combined cycle. The increase achieved in the performance reduces the specific emission to 79 g/kWh and 69 g/kWh what in relative terms is between 16 % and 15 %. The value obtained in the emission of the combined cycle is similar to the conventional Brayton-Rankine cycles.

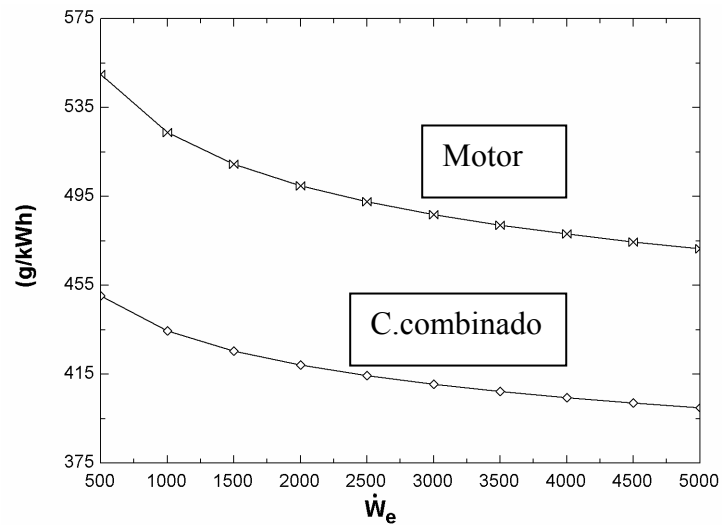


Fig. 2.- CO<sub>2</sub> emissions.

If the employment of the engine in cogeneration is compared with the combined cycle, the cogeneration system achieve better results. This way, although the electrical artificial efficiency is similar in both configurations for engines of 100 kWe, in engines of 5 MWe it overcomes 58 % in cogeneration, reaching only 50 % in combined cycle. If there is compared the saved primary energy index, it always turns out to be a more efficient the cogeneration than the combined cycle, being the saving of 38 % in the first one and of 30 % in the second one for an engine of 5 MWe. As conclusion, there has been proved that the constitution of a combined cycle of gas-Rankine organic cycle is technical and economically feasible, improving the profitability of the electrical production of the gas engine, although not being so efficient as the employment of the engine in cogeneration. Due to additional investment in Rankine cycle isn't so high it's possible to think in a hybrid system, which alternates between intensified electricity production (combined cycle) and the combined heat and power, depending on demand.