

HIBRIDACIÓN DE UNA PILA PAFC OPERANDO EN POLIGENERACIÓN CON CICLO DE RANKINE ORGÁNICO

Autor: Caballero Águila, Javier.

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

Entidad Colaboradora: Foro de la Industria Nuclear Española.

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo estudia las ventajas de la hibridación de una pila de combustible PAFC con un ciclo de Rankine Orgánico transcrito (TC-ORC) actuando como ciclo de cola.

El ORC es accionado por los gases de escape de la pila. La pila se refrigera por agua presurizada que entra a la pila a 180 °C y experimenta un salto de 10 °C. Una parte de esta energía se emplea en precalentar los reactivos, quedando el resto disponible para cogeneración.

El comportamiento de la pila se modela mediante una curva de rendimiento eléctrico en función de la corriente adimensionalizada. El rendimiento se ha obtenido empíricamente a partir de una pila PEMFC dado que las reacciones que se producen en sus electrodos son las mismas que las que se producen en los de una PAFC. La electricidad y el calor generado por la pila se obtienen a partir de la ecuación de combustión con aire del hidrógeno. Se ha considerado una PAFC típica de 200 kW de potencia eléctrica nominal y temperatura de trabajo igual a 200 °C.

Se ha prestado especial atención al diseño de la caldera de recuperación del ciclo (HRVG). Por un lado, se ha escogido un ciclo transcrito para conseguir un ajuste óptimo entre el perfil de temperaturas del fluido de trabajo y el de los gases de escape (Figura 1). Por otro lado se ha elegido R245fa como fluido orgánico por ser el que mejor se ajusta a las exigencias establecidas: 200 °C de temperatura máxima en el foco

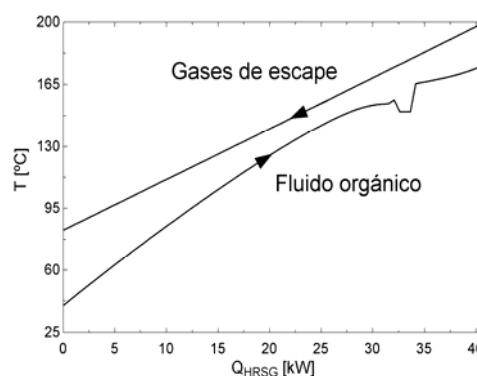


Figura 1. Perfil de temperaturas en la caldera con TC-ORC.

caliente, presión de saturación comprendida entre 1 y 30 bar, presión crítica menor de 60 bar y no ser dañino para el medio ambiente. Por último se ha optimizado la presión en la caldera (Figura 2); el valor obtenido es 44 bar, que es un 22 % superior al de la presión crítica.

La caldera y el condensador son intercambiadores de flujo cruzado con aletas continuas en el lado por el que no circula el fluido orgánico. En el condensador se emplea aire para evacuar el calor. Tanto la bomba como la turbina son máquinas volumétricas (de tornillo, engranajes o pistones axiales).

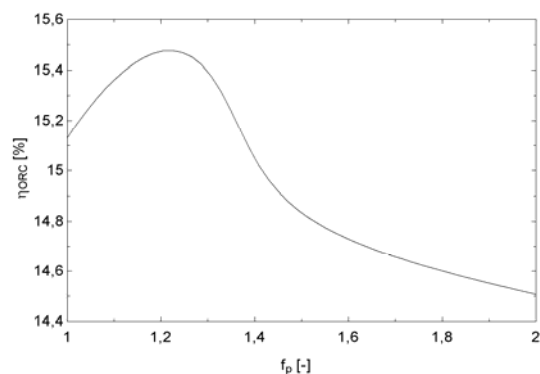


Figura 2. Presión en la caldera óptima para el R245fa.

Para evaluar el efecto de añadir un ORC para el aprovechamiento del contenido exergético de los gases de escape se han modelado una aplicación de generación eléctrica (el calor no se aprovecha), una de cogeneración residencial (el calor producido se usa en invierno, 4000 h/año), una de cogeneración industrial (el calor producido se utiliza durante todo el año, 8000 h/año) y una de trigeneración (4000 h/año de calor y, empleando una máquina de absorción de doble efecto operada con $H_2O/LiBr$, 4000 h/año de frío). Cada aplicación se ha comparado con la aplicación equivalente empleando la pila sin ORC.

La estimación de la inversión total de la planta se ha realizado mediante el método Bejan. El precio del hidrógeno se ha considerado un 25 % superior al del gas natural (ya que actualmente la gran mayoría del hidrógeno se produce mediante reformado por vapor de dicho gas) y una tasa de crecimiento anual en el precio del gas del 5%. Los costes de operación y mantenimiento considerados son de 10 €/MWh para la pila y 15 €/MWh para el ORC (con una tasa de crecimiento anual para ambos del 2.5%). Se ha considerado una inflación anual del 3% y una tasa de descuento del 10%. Tomando como base la experiencia con pilas PAFC, se ha considerado una vida útil de la pila de 10 años. El precio medio de venta de electricidad en España en 2006 fue de 87.55 €/MWh y se ha tomado una tasa de crecimiento anual de éste del 6%.

Se han desarrollado dos códigos con *Engineering Equation Solver* para modelar técnica y económicamente el sistema: DISEÑO y OPERACIÓN. El primero permite obtener los parámetros de diseño de los intercambiadores y estima la producción energética del sistema para el punto nominal. El segundo estima la producción energética del sistema ante variaciones en las condiciones de diseño (grado de carga, temperatura ambiente, exceso de aire, etc.).

Los resultados obtenidos indican que en los casos en los que no se aprovecha el calor disponible para cogeneración resulta conveniente trabajar con excesos de aire elevados ($\lambda=9$) para intensificar la producción eléctrica del ORC. Por el contrario, en aplicaciones de poligeneración se consigue mayor rentabilidad con

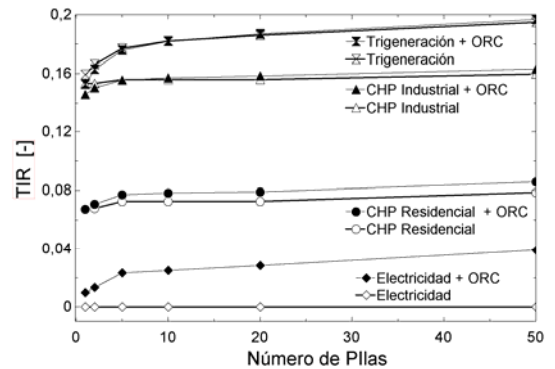


Fig. 3. TIR frente al número de pilas para diferentes configuraciones ($\lambda=1$).

excesos de aire pequeños ($\lambda=1$). Sin embargo, esto hace que la potencia generada por el ORC sea pequeña, con la consiguiente penalización por su inversión. El empleo de varias pilas trabajando en paralelo permite beneficiarse de la economía de escala, reduciendo dicha penalización. La operación en poligeneración mejora notablemente la rentabilidad. Estas conclusiones quedan resumidas en la figura 3. Este trabajo refleja que la viabilidad económica de pilas PAFC está sujeta a la utilización de éstas para poligeneración, siendo la configuración más rentable la trigeneración. Cuando ésta no es posible, la cogeneración industrial obtiene una TIR del orden del 15.5%. En ambos casos, la adición de un ORC es sólo recomendable cuando se utilizan más de 5 pilas (1 MW). Cuando no existe la posibilidad de cogenerar, la adición de un ORC incrementa notablemente la rentabilidad del sistema aunque sin lograr la viabilidad económica, la cual requeriría un precio de la electricidad superior al actual. La utilización de pilas PAFC sólo para generación eléctrica no es una alternativa actual y debe considerarse como una tecnología a medio plazo.

ORGANIC RANKINE CYCLE FOR ENERGY RECOVERY FROM A PAFC INTO TRIGENERATION SYSTEMS.

Author: Caballero Águila, Javier.

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

Collaborating organization: Foro de la Industria Nuclear Española.

PROJECT SUMMARY

This work explores the potential of a combined cycle with a topping intermediate temperature PAFC and a bottoming trans-critical Organic Rankine cycle (TC-ORC).

Organic Rankine cycle is started by the gases exhausting the fuel cell. The fuel cell is cooled by water, which experiences a 10°C temperature jump (inlet temperature being 180°C). A fraction of this sensible thermal energy is used for hydrogen and air preheating, and the rest is available for cogeneration.

Fuel cell performance is modelled globally by defining a dimensionless electrical efficiency as a function of current. The efficiency has been empirically determined by testing a PEMFC fuel cell, which partial reactions are the same as in PAFC. The electricity and heat resulting from fuel cell operation are estimated using a hydrogen-air combustion model. A typical PAFC of an electric power of 200 kW and an operation temperature of 200°C has been considered.

Given the key role of Heat Recovery Vapour Generator (HRVG) performance in combined cycles, particular attention has been paid to definition of the various components involved. On one side, a trans-critical cycle has been chosen due to its excellent match of exhaust gas temperature profile (Figure 1). On the other, R245fa has been adopted as the organic fluid since its properties fits better than others to requirements such

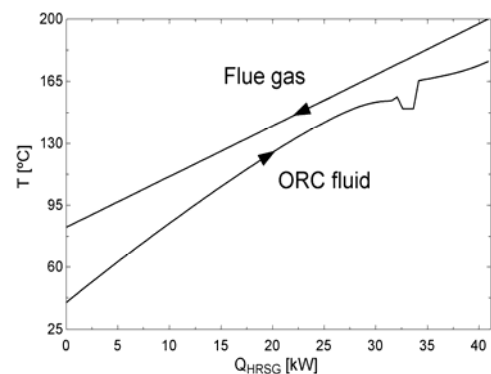


Figure 1. HRVG diagram with supercritical ORC.

as: heat source initially at 200 °C, saturation pressure between 1 and 30 bar, critical pressure lower than 60 bar and environmentally harmless. The best

pressure for ORC fluid in HRVG has been also determined (Figure 2), resulting a pressure of 44 bar, which is about 22% higher than critical one.

Both HRVG and condenser are gas side finned, cross flow heat exchangers (air being the heat sink in the condenser).

Expander device and pump are both a volumetric machine (screw, gear or axial pistons one).

In order to assess the effect of adding an ORC bottoming cycle to fuel cell, the following applications have been modelled: a power source application

(heat produced is not used), a residential cogeneration application (heat produced is used in winter, 4000 h/y), an industrial cogeneration application (heat produced is used along the year, 8000 h/y) and a tri-generation (4000 heating h/y and, considering a double effect H₂O/LiBr absorption machine, 4000 cooling h/y). Each application has been compared with the equivalent performance of the Fuel cell without ORC.

Bejan methodology is used to estimate the overall power plant investment. Hydrogen cost is assumed to be 25% higher than natural gas one (as most of hydrogen is produced from steam-methane reforming nowadays), and a gas cost growth of 5%/yr has been adopted. Operation and maintenance cost is considered 10 €/MWh for fuel cell and 15 €/MWh for ORC (both cost growths being 2.5%/yr). Inflation rate and discount rate have been considered 3% and 10%, respectively. A life span of 10 years has been assumed according to PAFC experience. And, finally, electricity cost in Spain was 87.55 €/MWh and a cost growth of 6%/yr has been considered.

The technical and economic models have been implemented in *Engineering Equation Solver* codes: DESIGN mode and OPERATION. The former aims to sizing heat exchangers and assessing plant thermal performance at the nominal point. The latter analyzes sensitivity of the plant working under steady state to specific variables (i.e., work load, environment temperature, air excess, etc).

The results show that in those applications that does not involve cogeneration a high air excess ($\lambda=9$) should be used in order to increase ORC power output. On

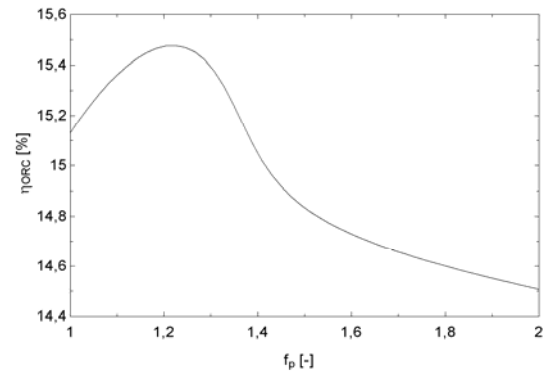


Figure 2. Optimum pressure of the R245fa in the HRVG.

the contrary, in poligeneration applications a slight air excess ($\lambda=1$) provides higher economic profitability even though the ORC power output is low, so that investment is heavily taxed. By adding several cells working in a parallel scheme such a penalty can be damped to some extent. Inclusion of poligeneration helps economic feasibility. Figure 3 shows this double dependence.

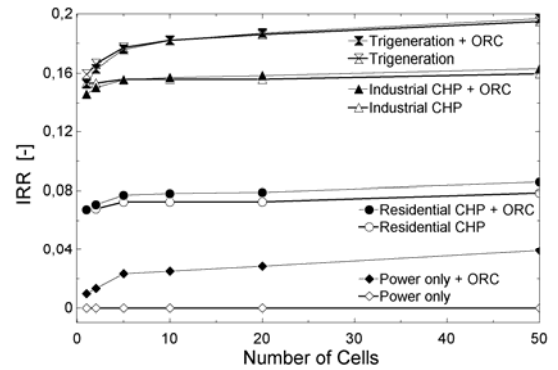


Fig. 3. IIR versus number of cells for different plant arrangements ($\lambda=1$).

This work highlights that economic feasibility of PAFC demands use of co- or tri- generation, been trigenation the best option. When trigenation application is not feasible industrial combined heat and power gives internal rate of return around 15.5%. In both options it should be used more than 5 cells (1 MW) for ORC inclusion to mean a benefit. However, when CHP is not feasible, ORC inclusion improves notably the internal rate of return, although it does not reach economic feasibility yet and a higher electricity cost than the present one would be needed to reach economic feasibility. Using PAFC only as a power source should be seen as a mid-term technology rather than a present option.