

MODELADO DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC) A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

PERIS PÉREZ, Bernardo ⁽¹⁾; NAVARRO ESBRÍ, Joaquín ^{(1), (2)}; MOLÉS RIBERA, Francisco ⁽¹⁾;

MOTA BABILONI, Adrián ⁽¹⁾

bperis@uji.es

⁽¹⁾Universidad Jaume I, Grupo ISTENER, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción

⁽²⁾ Rank®

RESUMEN

El ciclo Rankine orgánico (ORC) es una tecnología prometedora para el aprovechamiento de fuentes térmicas de baja temperatura. Así, su utilización para la recuperación de calor residual industrial está considerada una medida de ahorro y eficiencia energética que podría contribuir con numerosos beneficios energéticos, medioambientales y económicos. En este sentido, un módulo comercial de ORC, destinado a la recuperación de calor residual de un horno cerámico, fue evaluado y caracterizado experimentalmente en un trabajo previo.

Partiendo de este punto, el objetivo de este trabajo es utilizar los datos experimentales para desarrollar un modelo semiempírico del sistema ORC. Para ello, se analizan los resultados experimentales de la caracterización del sistema y se determinan las condiciones generales de diseño del modelo y las particulares del módulo ORC. Posteriormente, con el modelo desarrollado, se simulan los puntos de funcionamiento obtenidos experimentalmente y, de este modo, se validan los resultados teóricos.

Palabras clave: ORC (ciclo Rankine orgánico), recuperación de calor residual, industria cerámica.

1. Introducción

El ciclo Rankine orgánico (ORC, del inglés organic Rankine cycle) se ha establecido como una forma eficiente de generación eléctrica a partir de fuente de calor de baja calidad [1]. Se trata de un ciclo de potencia similar al ciclo Rankine de vapor, pero que utiliza fluidos de trabajo más volátiles que el agua para mejorar la eficiencia en aplicaciones de baja temperatura [2]. Centrándonos en el uso del ORC para solo producción de electricidad en aplicaciones de recuperación de calor residual industrial, son muchos los beneficios energéticos, medioambientales y económicos que se podrían lograr. Por ejemplo, en Europa se ha estimado que la potencia eléctrica bruta podría alcanzar 2.7 GW, pudiendo generar hasta 21.6 TWh anuales, ahorrar 1,957 millones de euros por año y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera en 8.1 millones de toneladas [3].

Dentro del calor residual de gases industriales hay un amplio margen de temperaturas de fuentes, de las cuales más del 50% se corresponden con calor residual de baja calidad, cuyas temperaturas generalmente son inferiores a 300-350 °C [4]. Es por ello que la alta disponibilidad de calor residual industrial de baja calidad representa una oportunidad para la utilización de sistemas de recuperación basados en el ORC. En este sentido, un módulo comercial ORC, de una potencia eléctrica nominal de 20 kW, fue utilizado en una industria cerámica para la recuperación de calor residual de baja calidad [5]. El módulo ORC fue optimizado y caracterizado experimentalmente en trabajos previos [6], obteniendo una eficiencia eléctrica bruta superior al 12%, mediante la recuperación de calor residual a un nivel térmico inferior a 170 °C y disipando directamente contra ambiente.

Partiendo de este punto, el objetivo de este trabajo es utilizar los datos experimentales obtenidos para desarrollar un modelo del sistema ORC que, tras su validación, pueda ser utilizado para nuevos estudios, diseños, u optimizaciones del propio ORC.

Con este propósito, el resto del documento se organiza como sigue. La Sección 2 describe la aplicación del ORC en el proceso industrial y aborda la selección del tipo de modelo a utilizar. La Sección 3 expone las condiciones de diseño más relevantes en base a los datos experimentales y define el método de cálculo y ecuaciones termodinámicas a utilizar. La sección 4 presenta los resultados de la simulación del modelo, así como su validación con datos reales de operación. Finalmente, la Sección 5 recoge las principales conclusiones del trabajo.

2. Antecedentes

En este apartado se describe de forma genérica la instalación de recuperación de calor residual, prestando especial atención al módulo ORC. Además, se presentan los diferentes tipos de modelos disponibles y se selecciona el más adecuado para este trabajo.

3.1. Instalación de recuperación de calor residual

Esta aplicación consiste en aprovechar calor residual de gases de escape de un horno cerámico. Concretamente, en la recuperación del calor residual disponible en el aire de enfriamiento indirecto, el cual se caracteriza por ser una fuente térmica de gases limpios y de alta temperatura, debido a su proximidad a los quemadores de combustión del horno.

La instalación de recuperación está principalmente compuesta por un intercambiador de calor conocido como recuperador, situado en una derivación de la conducción principal de los gases, mostrada en la Fig. 1.a, y un anillo de transferencia de calor que utiliza aceite térmico para transportar la energía térmica desde la fuente de calor hasta el módulo ORC, tal y como se esquematiza en la Fig. 1.b.

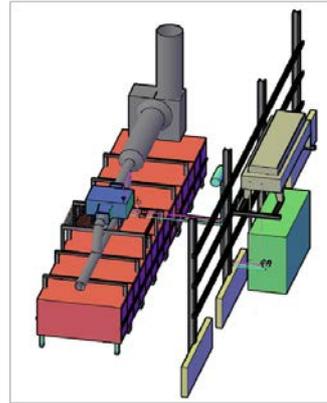
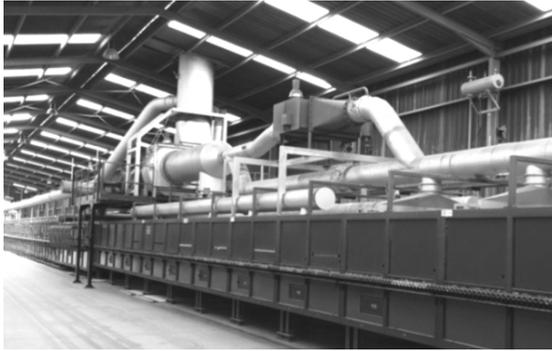


Figura 1: Instalación de recuperación de calor residual: (a) horno cerámico con intercambiador de calor, (b) esquema del conjunto del sistema.

3.2. Módulo ORC

El ORC utilizado en esta aplicación es un módulo comercial de la marca Rank®, mostrado en la Fig. 2.a, el cual fue optimizado durante las fases de diseño y construcción. Así, el sistema emplea una configuración de ciclo regenerativa que le permite no solo recuperar la energía térmica de la fuente de calor, sino también el calor residual de la salida del expansor para precalentar el líquido, mejorando la eficiencia eléctrica del ciclo. Esta configuración regenerativa se ha esquematizado en la Fig. 2.b, junto con la posición de los instrumentos de medida utilizados durante las pruebas experimentales y la numeración de los puntos termodinámicos analizados posteriormente. El fluido de trabajo utilizado es el R245fa, comúnmente utilizado entre los sistemas ORC, ya que se trata de un fluido no inflamable, con baja toxicidad (nivel de exposición permitido sobre 300 ppm) y moderadas propiedades medioambientales [7], el cual ha sido probado como un buen fluido de trabajo para la recuperación de calor residual de baja calidad [8]. Pero sobre todo, destaca la utilización de un expansor volumétrico con una relación geométrica de volúmenes internos (V_i) elevada, tal y como se reconoce en la literatura para la tecnología de expansores volumétricos [9]. Este hecho es crucial para que el sistema pueda trabajar con gran eficiencia en aplicaciones de solo producción eléctrica y baja temperatura de fuente de calor, tal y como demostraron Clemente et al. [10] en su trabajo. Éstas y otras características del módulo ORC se recogen en la Tabla 1.

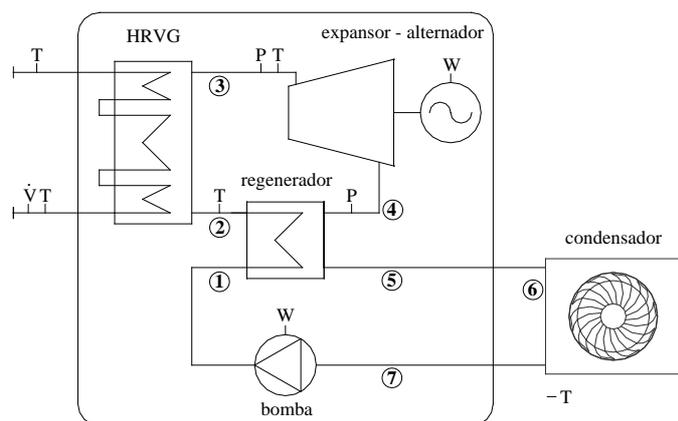


Figura 2: Módulo de recuperación de calor residual: (a) ORC y sistema de disipación instalados en el exterior de la planta industrial, (b) esquema del ciclo, instrumentos de medida y puntos termodinámicos.

Tabla 1: Características del módulo ORC de Rank®.

Potencia eléctrica nominal del alternador (kW)	20
Potencia térmica nominal (kW)	160
Configuración del ORC	subcrítica, regenerativa y con sobrecalentamiento
Fluido de trabajo	R245fa
Tecnología de expansión	volumétrica o desplazamiento positivo
Tipo de intercambiadores de calor	placas soldadas
Máxima temperatura de funcionamiento (°C)	170
Mínima temperatura de funcionamiento (°C)	120

3.3. Selección del tipo de modelo

Tres niveles de modelado para sistemas ORC pueden distinguirse en la literatura [9]:

- Modelo empírico o de tipo “caja negra”. Se caracteriza por muy bajo tiempo computacional y alta robustez numérica, pero no permite la extrapolación de los resultados más allá de los datos de calibración, no sirviendo pues como una herramienta para la simulación de condiciones diferentes.
- Modelo determinista o de tipo “caja blanca”. Es una herramienta potente que requiere altos tiempos computacionales. Se basa en una descripción exhaustiva de los equipos utilizados basado en ecuaciones diferenciales de las leyes de conservación de masa y energía, entre otras. La mayoría de los parámetros utilizados pueden ser introducidos (como la geometría del expansor o superficie de intercambio térmico), mientras que pocos son hallados.
- Modelo semiempírico o de tipo “caja gris”. Es un tipo de modelo que muestra bajos tiempos computacionales y buena robustez numérica. Permite la extrapolación parcial de datos de funcionamiento con la variación de condiciones de funcionamiento y características de diseño. Ésta se debe a la descripción de aspectos físicos de algunos parámetros del modelo. El uso típico de estos modelos es para el diseño de sistemas basados en puntos de operación en estados estacionario obtenidos experimentalmente.

Teniendo en cuenta que el objetivo del trabajo es desarrollar una herramienta basada en resultados experimentales de operación de un módulo ORC y características físicas de los componentes, así como tener agilidad para extrapolar su funcionamiento a otras condiciones de operación, el nivel de modelo más adecuado es el semiempírico o de tipo “caja gris”.

4. Metodología

En este apartado se aborda el modelo propuesto, describiendo las condiciones de modelización y procedimiento de cálculo.

4.1. Modelización del sistema

El modelo propuesto se ha esquematizado en la Fig. 3.a. En esta figura puede observarse que las variables de entrada, en cuanto a condiciones experimentales de operación, son la potencia térmica recuperada de la fuente de calor (Q_{in}) y las condiciones de disipación, por medio de la temperatura ambiente. El modelo está predefinido con características geométricas y de funcionamiento de los componentes del ORC, abordadas en el apartado siguiente, así como vinculado con una base de datos de propiedades termodinámicas de fluidos de trabajo, Refprop [11]. De este modo, el modelo simula cada punto de operación y resuelve todos los estados termodinámicos del ciclo, lo que a su vez permite el cálculo de los parámetros de interés.

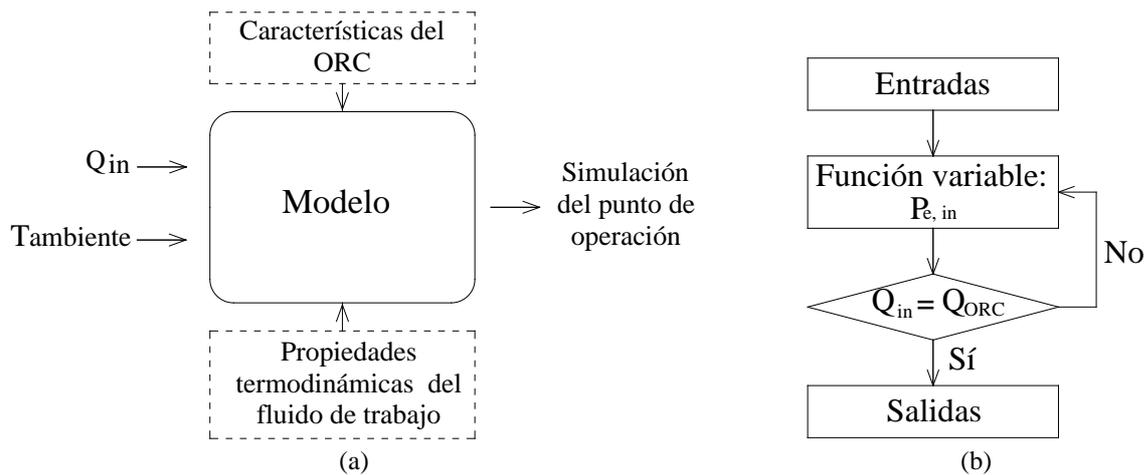


Figura 3: Esquema del modelo: (a) entradas y salidas, (b) procedimiento de cálculo.

En este apartado se describe el procedimiento de cálculo seguido por el modelo, representado en la Fig. 3.b. Las ecuaciones definidas a continuación siguen la nomenclatura descrita en el texto y la numeración de los puntos del ciclo termodinámico señalados en la Fig. 4.

4.2. Procedimiento y ecuaciones de cálculo del modelo

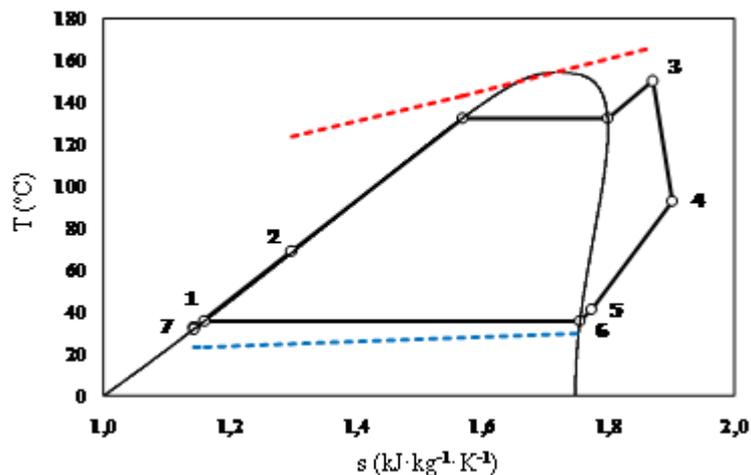


Figura 4: Ejemplo de cálculo del modelo para un punto de funcionamiento, condiciones de contorno y numeración de los estados termodinámicos utilizados.

En primer lugar se establecen las condiciones de evaporación. Para ello, el cálculo se inicia con una presión de entrada en el expansor ($P_{e, in}$) supuesta. Dicha presión, por un lado, se corresponde con la temperatura de evaporación del fluido de trabajo utilizado y, por otro, permite la obtención de la temperatura de entrada en el expansor para un sobrecalentamiento medio conocido. Este sobrecalentamiento medio y otros coeficientes obtenidos experimentalmente o geométricos de los componentes se recogen en la Tabla 2. Además, a partir del volumen geométrico de entrada en el expansor ($V_{e, in}$) y del rendimiento volumétrico hallado experimentalmente (ϵ_v), puede calcularse el caudal másico de fluido de trabajo (\dot{m}) que circula por la instalación, de acuerdo con la Ec. (1).

Tabla 2: Coeficientes utilizados en el modelo del ORC.

Datos experimentales promediados	
Sobrecalentamiento (K)	17.7
Rendimiento volumétrico del expansor, ε_v , y rendimiento isoentrópico del expansor, $\varepsilon_{e,iso}$ (%)	74.0
Subenfriamiento a la aspiración de la bomba (K)	3.8
Eficiencia de la bomba, $\varepsilon_{bomba,el,iso}$ (%)	45
Eficiencia máxima del expansor, $\varepsilon_{e,el,iso(máx.)}$ (%)	65
Eficiencia del regenerador, ε_{reg} (%)	90
Perdida carga en lado vapor baja presión (bar)	0.8
Características geométricas del expansor	
Caudal de volumen geométrico a la entrada, $V_{e,in}$ (m ³ /s)	4.30E-03
Relación geométrica de volúmenes, V_i	8.0

Las condiciones de condensación pueden establecerse a partir de la temperatura ambiente. Ello es posible debido al control mantenido por el condensador. Así, el condensador está equipado con un variador de frecuencia en los ventiladores que le permite mantener una diferencia de temperaturas constante entre condensación y ambiente de 12 K. Es por ello que a partir de la temperatura ambiente puede determinarse la temperatura y el resto de condiciones de condensación.

Las condiciones de aspiración de la bomba pueden establecerse a partir de la presión de condensación y el subenfriamiento conocido. De este modo, a partir de las mediciones del consumo eléctrico de la bomba y mediante el uso de la Ec. (2), se establece el valor de efectividad eléctrica isoentrópica de la bomba ($\varepsilon_{bomba,el,iso}$).

En cuanto a la caracterización del expansor varios parámetros deben ser considerados. En primer lugar, se tienen que conocer las citadas características geométricas, referidas al volumen de entrada ($V_{e,in}$) y relación geométrica de volúmenes (V_i). Dicha relación geométrica se utiliza también para hallar la eficiencia teórica del expansor, utilizada satisfactoriamente en trabajos previos [12], o efectividad teórica isoentrópica ($\varepsilon_{e,t,iso}$) según la Ec. (3). Ésta permite modelar el comportamiento del expansor bajo diferentes condiciones de operación, asociadas a sobre-expansión y sub-expansión, pero debe corregirse con un valor experimental. Para ello, se utiliza la efectividad eléctrica isoentrópica ($\varepsilon_{e,el,iso}$) definida en la Ec. (4). Tras esto, ya se puede determinar la potencia eléctrica bruta generada (W_g) según la Ec. (5). Otro indicador de eficiencia a tener en cuenta en el expansor es la efectividad isoentrópica ($\varepsilon_{e,iso}$), según la Ec. (6), debido a su influencia sobre el regenerador. Por su parte, el regenerador se caracteriza mediante un ratio de efectividad (ε_{reg}) definido en la Ec. (7).

De este modo el ciclo completo queda simulado, pudiendo obtener la potencia térmica recuperada por el ORC mediante la Ec. (8). Entonces, el modelo realiza una comparación entre la potencia térmica recuperada (Q_{ORC}) y la variable de entrada al modelo (Q_{in}), iterando el cálculo hasta su resolución. En ese momento cualquier parámetro de interés puede obtenerse, como lo son en este caso la eficiencia eléctrica bruta, según la Ec. (9), y la eficiencia eléctrica neta del ciclo, según la Ec. (10).

Por otro lado, se utiliza la Ec. (11) para cuantificar el error medio y máximo (o ancho de banda) del los resultados.

$$\dot{m} = \rho_3 \cdot \frac{V_{e,in}}{\varepsilon_v} \quad (1) \quad \varepsilon_{reg} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_6} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{bomba,el,iso} = \frac{\dot{m} \cdot (h_1 - h_7)}{W_{bomba}} \quad (2) \quad Q_{ORC} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (9)$$

8)

$$\varepsilon_{e,t,iso} = \frac{(h_3 - h_{Vi,iso}) + \frac{1}{\rho_{Vi,iso}} \cdot 100 \cdot (P_{Vi,iso} - P_4)}{h_3 - h_{4,iso}} \quad (3) \quad \eta_g = \frac{W_g}{Q_{ORC}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{e,el,iso} = \frac{W_g}{\dot{m} \cdot (h_3 - h_{4,iso})} \quad (4) \quad \eta_n = \frac{W_g - W_{bomba}}{Q_{ORC}} \quad (10)$$

$$W_g = \dot{m} \cdot (h_3 - h_{4,iso}) \cdot \varepsilon_{e,t,iso} \cdot \varepsilon_{e,el,iso} (máx.) \quad (5) \quad |\bar{x}| = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{x_{model,i} - x_{experimental,i}}{x_{experimental,i}} \right) \right| \quad (11)$$

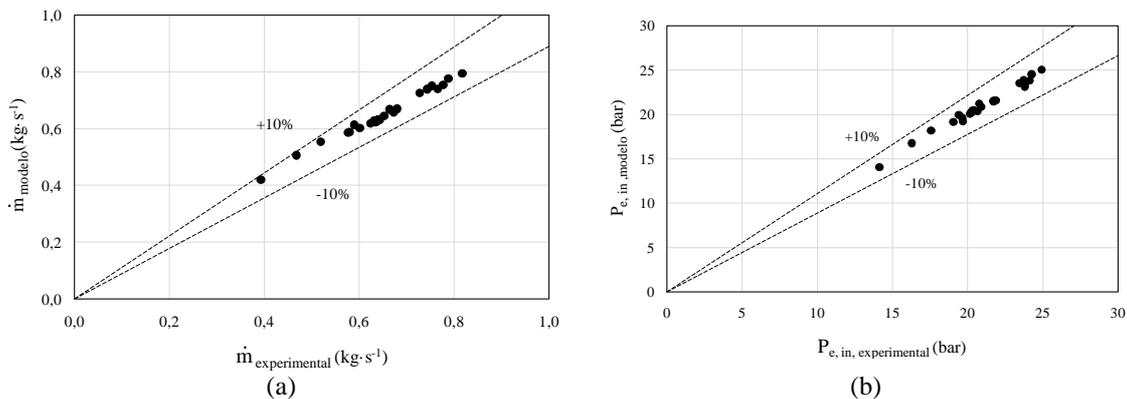
$$\varepsilon_{e,iso} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,iso}} \quad (6)$$

8. Resultados

En este apartado se abordan los resultados de la simulación y la validación de los datos.

En primer lugar se valida el caudal másico del fluido de trabajo, el cual está directamente influenciado por varios aspectos importantes del funcionamiento del ORC, como son la potencia térmica recuperada de la fuente, la potencia intercambiada en el regenerador y el comportamiento del expansor. Así, en la Fig. 5.a puede verse que el error obtenido permanece dentro de un ancho de banda del 10%. Los valores exactos de los errores se recogen en la Tabla 3.

La presión de evaporación también es importante que tenga un valor bajo de error, ya que afecta a las condiciones de recuperación de calor y a la eficiencia termodinámica del ciclo. En la Fig. 5.b puede verse que el error es muy pequeño, con un ancho de banda menor al 3.6%. Este valor es indicativo del pequeño error asumido al considerar constante el rendimiento volumétrico del expansor. La validación de las eficiencias del ciclo, bruta y neta, se representan en las Fig. 5.c y Fig. 5.d respectivamente, demostrando de nuevo que el error del modelo en los parámetros de interés se mantiene dentro de un estrecho ancho de banda menor al 10%.



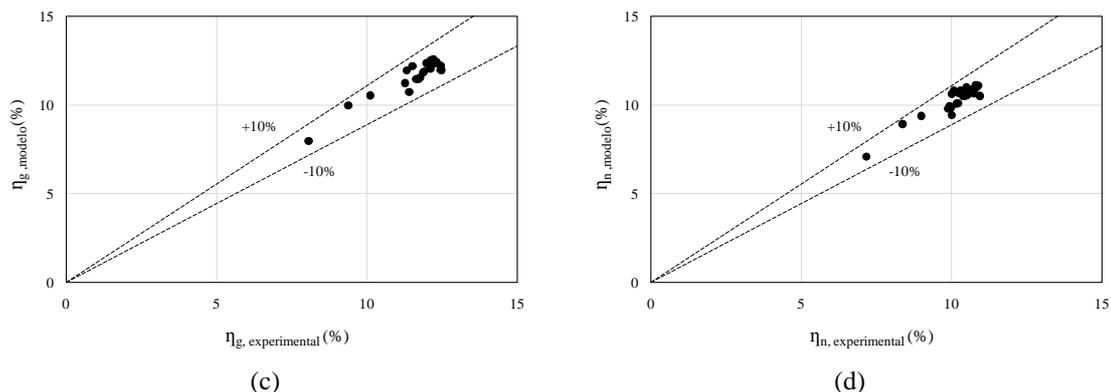


Figura 5: Validación del modelo: (a) caudal másico del fluido de trabajo, (b) presión de evaporación, (c) eficiencia bruta del ciclo, (d) eficiencia neta del ciclo.

Tabla 3: Errores obtenidos de la validación del modelo para los parámetros de interés.

	Error medio $ \bar{\chi} $	Ancho de banda $ \bar{\chi} _{(\max)}$
\dot{m} (%)	2.07	8.16
$P_{e, in}$ (%)	1.15	3.56
η_g (%)	2.37	6.33
η_n (%)	2.75	7.54

9. Conclusiones

En este trabajo se hace uso de los datos experimentales de funcionamiento de un módulo ORC para elaborar una herramienta flexible de modelado del sistema. El trabajo desarrollado ha consistido en la definición del tipo de modelo, selección de las condiciones de modelado basadas en datos experimentales de operación del ORC, implementación de las ecuaciones termodinámicas y validación del modelo.

De este modo, se ha obtenido una herramienta capaz de simular todos los puntos termodinámicos del ORC y obtener los parámetros de salida deseados a partir únicamente de la potencia térmica recuperada y la temperatura ambiente. De hecho, se han obtenido diferentes parámetros relevantes, tales como el caudal másico de fluido de trabajo, la presión de evaporación y las eficiencias eléctricas bruta y neta. Los resultados han sido validados con los datos de operación reales, mostrando que el mayor valor de error medio es inferior al 3%, así como todos los puntos dentro de un ancho de banda inferior al 10%.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Industria de la “Generalitat Valenciana (España)”, por su asistencia financiera bajo el proyecto INIDIV2010022, y a Expander Tech - Rank® por su apoyo en este proyecto. También agradecer profundamente a la Universidad Jaume I por su financiación mediante la beca predoctoral PREDOC/2013/28 de la “Convocatòria d’ajudes predoctorals per a la formació de personal investigador del Pla de promoció de la investigació de la Universitat Jaume I de Castelló (Spain)”.

Referencias

- [1] YAMADA, N. TOMINAGA, Y. YOSHIDA, T. *Demonstration of 10- W p micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery*. Energy, 2014, vol. 78, pp. 806–13.
- [2] LI, J. PEI, G. LI, Y. WANG, D. JI, J. *Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures*. Energy, 2012, vol. 38, pp. 85–95.
- [3] CAMPANA, F. BIANCHI, M. BRANCHINI, L. DE PASCALE, A. PERETTO, A. BARESI, M. FERMI, A. ROSSETI, N. VESCOVO, R. *ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings*. Energy Convers Manag, 2013, vol. 76, pp. 244–52.
- [4] WANG, HT. WANG, H. ZHANG, ZM. *Optimization of Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Fueled Organic Rankine Cycle*. J Iron Steel Res Int, 2012, vol.19, pp. 30–6.
- [5] PERIS, B. NAVARRO-ESBRÍ, J. MOLÉS, F. MOTA-BABILONI, A. *Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry*. Energy, 2015. Doi: 10.1016/j.energy.2015.03.065.
- [6] PERIS, B. NAVARRO-ESBRÍ, J. MOLÉS, F. COLLADO, R. MOTA-BABILONI, A. *Performance evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) for power applications from low grade heat sources*. Appl Therm Eng, 2015, vol. 75, pp. 763–9.
- [7] MOLÉS, F. NAVARRO-ESBRÍ, J. PERIS, B. MOTA-BABILONI, A. BARRAGÁN-CERVERA, A.KONTOMARIS, K. *Low GWP alternatives to HFC-245fa in Organic Rankine Cycles for low temperature heat recovery: HCFO-1233zd-E and HFO-1336mzz-Z*. Appl Therm Eng, 2014, vol. 71, pp. 204–12.
- [8] PERIS, B. NAVARRO-ESBRÍ, J. MOLÉS, F. *Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery*. Appl Therm Eng, 2013, vol. 61, pp. 364–71.
- [9] LEMORT, V. GUILLAUME, L. LEGROS, A. DECLAYE, S. QUOILIN, S. *Comparison of piston, screw and scroll expanders for small-scale Rankine cycle systems*. Proceedings of the 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies, 2013.
- [10] CLEMENTE, S. MICHELI, D. REINI, M. TACCANI, R. *Energy efficiency analysis of Organic Rankine Cycles with scroll expanders for cogenerative applications*. Appl Energy, 2012, vol. 97, pp. 792–801.
- [11] LEMMON E, HUBER M. NIST REFPROP standard reference database 23. Version 8.0. User's guide. NIST 2007.
- [12] PERIS, B. NAVARRO-ESBRÍ, J. MOLÉS, F. MARTÍ, JP. MOTA-BABILONI, A. *Experimental characterization of an Organic Rankine Cycle (ORC) for micro-scale CHP applications*. Appl Therm Eng, 2015, vol. 79, pp. 1–8.