Cod. 9211 | Teoría y métodos educativos | 5801.03 Desarrollo del programa de estudios

Enfoque práctico en la enseñanza del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) en un curso de termodinámica aplicada

A practical approach for teaching the Organic Rankine Cycle (ORC) in an advanced thermodynamics course

Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Francisco Molés Ribera y Carlos Mateu Royo
Universitat Jaume I (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9211

1. INTRODUCCIÓN

Los cursos de termodinámica son necesarios para que los ingenieros entiendan cómo se transfiere la energía [1]. Los conceptos comunes enseñados y practicados en cada curso de termodinámica incluyen ciclos termodinámicos básicos. A continuación de esto, los estudiantes de ingeniería pueden profundizar en las diferentes ramas de la termodinámica aplicada, para estar preparados para trabajar en procesos industriales, instalaciones de energía renovable, sistemas de producción de calor y frío, y plantas de calor y energía combinados (CHP), entre muchas otras. Según la Asociación Europea de Universidades (EUA), las universidades tienen un papel fundamental que desempeñar como actores clave en la energía, por lo que se combinan diferentes tecnologías, sistemas, economías y mercados energéticos, entre otros, para resolver los desafíos existentes de manera integral [2].

Una tecnología que se está volviendo relevante en los últimos años en el campo de la generación de energía sostenible es el ciclo orgánico de Rankine (ORC), que puede aumentar la eficiencia global de diferentes sectores industriales y de energías renovables. Su funcionamiento es como el de un ciclo típico de Rankine, pero en lugar de usar agua, usa un fluido orgánico con temperatura crítica más baja para usarse a temperaturas menores, donde la mayoría del calor residual industrial puede reutilizarse en procesos de cogeneración [3]and the selection of the optimal conversion technology and size, are highly influenced by the typology of energy demand (load-duration curve, temperature of heat demand, heat and electricity load patterns. Hasta la fecha, en la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de métodos exitosos de enseñanza del ciclo clásico de Rankine en instituciones de educación superior. La mayoría de ellos incluyen simuladores robustos porque pueden desarrollarse para la enseñanza de la termodinámica aplicada para analizar diferentes configuraciones y condiciones de operación de manera simple, y responder a la necesidad de un análisis rápido de datos y rendimiento del sistema [4].

Se debe considerar la práctica real de estos conceptos mostrados en teoría y practicados con software para alcanzar una comprensión más profunda de los conceptos. Kandpaland Broman [5] incluye entre sus recomendaciones fortalecer los programas de educación sobre energías renovables la introducción de capacitación práctica para los estudiantes, por ejemplo, mediante la realización de sesiones de laboratorio o visitas a sistemas de trabajo reales. Bornasal et al. [6] llegó a la conclusión de que el proceso de planteamiento y resolución de problemas es importante para absorber nuevos conceptos para que el proceso de aprendizaje siga un marco de crecimiento conceptual que pueda replicarse en los cursos.

Sin embargo, los sistemas ORC pueden aplicarse a aplicaciones a pequeña escala y, por lo tanto, ofrecen una solución para estudiar una nueva aplicación de energía sostenible en las universidades. Meyer et al. [7] mostró el proceso de diseño requerido para la construcción de una banco de pruebas de ORC a pequeña escala y destacó problemas con la selección del producto, la adquisición y el ensamblaje de la máquina. De este modo, Bonk et al. [8] propuso y diseñó un banco de pruebas ORC de 1 kW para fines educativos y de investigación, pero en este momento no hay resultados sobre la implementación exitosa de ambas aplicaciones.

Debido a la notoriedad de los sistemas ORC en los últimos años como una forma de producir electricidad sostenible [9] y que su tamaño es adecuado para laboratorios, su introducción en sesiones prácticas de estudios de ingeniería puede ser exitosa para trabajar conceptos termodinámicos y ampliar el conocimiento de ORC. La recuperación del calor residual será muy relevante para alcanzar una descarbonización del sector industrial y la producción de electricidad verde. A pesar de que la tecnología se ha investigado intensamente durante los últimos años, y se pueden encontrar muchos casos exitosos y proveedores de tecnología, aún es difícil encontrarla en comparación con otras tecnologías bien establecidas como los paneles fotovoltaicos. Este trabajo presenta cómo se puede introducir una sesión de laboratorio utilizando un módulo ORC comercial y resolución de problemas reales y los conceptos principales a considerar en el desarrollo de una sesión de laboratorio con diferentes partes y enfoques. Las principales tareas realizadas por los estudiantes, y los resultados y resultados de esta actividad educativa han sido definidos y justificados. Esta sesión tiene un gran potencial de réplica en muchos cursos universitarios de termodinámica aplicada y procesos industriales y se convierte en una actividad de aprendizaje común puesto que un número significativo de instituciones de educación superior han desarrollado o comprado plataformas de prueba ORC para investigación que pueden adaptarse para la enseñanza.

2. EL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE (ORC)

2.1. EL CICLO ORC

El sistema ORC utiliza una fuente de temperatura más alta para producir energía mecánica y rechazar el calor a fuentes de temperatura más bajas. Su funcionamiento básico sigue los principios del ciclo de Rankine y, por lo tanto, presenta los mismos componentes, y el fluido de trabajo (también conocido como refrigerante) sigue los mismos procesos (Fig. 1). Los

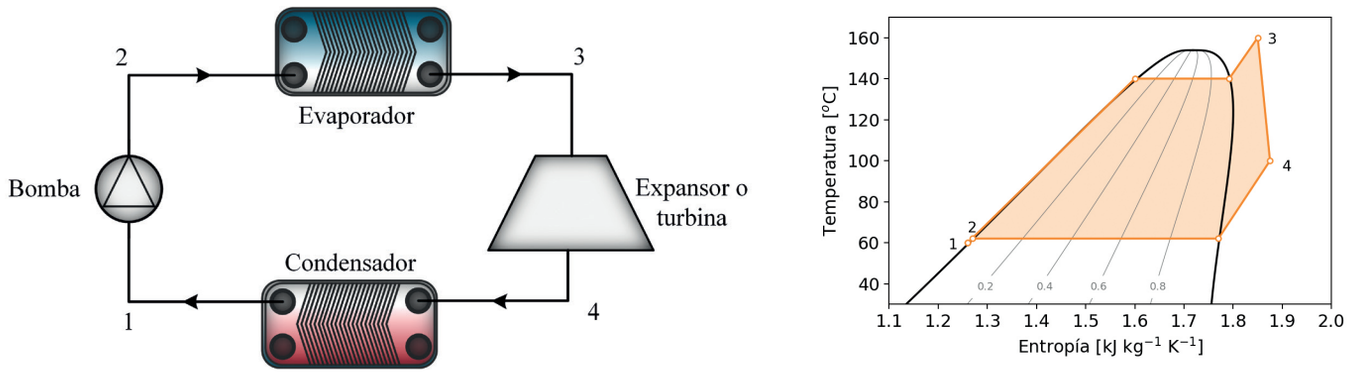


Figura 1: Esquema ORC básico y su funcionamiento en un diagrama Ts (utilizando HFC-245fa)

ciclos ORC (tanto en un ciclo combinado como independientes) parecen ser rentables en caso de demanda de calor a baja temperatura. De lo contrario, se requiere un ORC flexible para satisfacer la demanda de calor. Para los usuarios industriales, una configuración más simple sin ORC puede ser más competitiva que una ORC flexible, en función de los costos iniciales, la tasa de descuento y las tarifas de alimentación.

Desde el punto 1, el líquido saturado / subenfriado se presuriza usando una bomba, típicamente de tipo diafragma. Luego, el nivel térmico del fluido de trabajo aumenta al usar un evaporador, en el cual el calor se intercambia típicamente usando calor residual o fuentes renovables. Allí, el fluido de trabajo se calienta primero en fase líquida hasta alcanzar la temperatura de saturación a la presión correspondiente, luego se evapora y, en la parte final del evaporador, este fluido de trabajo, en fase gaseosa, se sobrecalienta para tener una expansión en seco. Luego, el fluido de trabajo se expande, y allí la energía del fluido se convierte en energía mecánica. Una gran parte de ella se convierte en energía eléctrica que se puede usar para autoconsumo, o se puede inyectar en la red eléctrica. Finalmente, este ciclo termodinámico se cierra condensando el fluido de trabajo, después de desrecalentarlo. Aunque el calor rechazado por el condensador puede ser disipado al ambiente, es preferible usarlo en otro proceso que pueda reutilizar este calor residual de baja temperatura. Se calcula la eficiencia térmica de los ciclos de ORC, dividiendo la potencia de salida generada por el calor de entrada (Ecuación (1)), de la misma manera que los ciclos de Rankine convencionales.

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{evap}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (1)$$

Se han propuesto diferentes arquitecturas de ORC para mejorar la eficiencia del sistema (mayor potencia de salida de ORC para la misma entrada de calor) por diferentes métodos. Sin embargo, para ser técnicamente factible y requerir un mantenimiento mínimo y reducir los problemas operativos, su complejidad debe ser limitada. De esta manera, la configuración regenerativa (Fig. A.1) se destaca porque tiene beneficios energéticos y operativos con la única adición de un intercambiador de calor adicional, el regenerador (también llamado recuperador).

2.2. FLUIDOS DE TRABAJO PARA ORC

El fluido de trabajo ORC más extendido es el HFC-245fa (HFC: HydroFluoroCarbon) por su punto crítico adecuado para ofrecer un alto rendimiento para este tipo de aplicaciones, potencial de agotamiento de ozono (PAO) cero, pendiente seca, alta densidad de vapor, alto calor latente, y presiones moderadas, entre otros. El principal problema es su valor relativamente alto de potencial de calentamiento atmosférico (PCA) (858). Además de los muchos beneficios que ofrecen los refrigerantes naturales, los HFO (HFO: HydroFluoroOlefin) y HCFO (HCFO: HydroChloroFluoroOlefin) parecen ser candidatos prometedores para reemplazar el HFC-245fa en las instalaciones existentes. La Tabla A.1 (incluida en el Apéndice) muestra las principales propiedades del HFC-245fa, y dos candidatos, HCFO-1223zd(Z) y HFO-1336mzz-Z, cuyo beneficio principal en comparación con el HFC-245fa es el muy bajo valor de PCA, aproximadamente 1.

3. SESIÓN DE LABORATORIO CON ORC

3.1. EL CURSO SELECCIONADO PARA IMPLEMENTAR LA SESIÓN

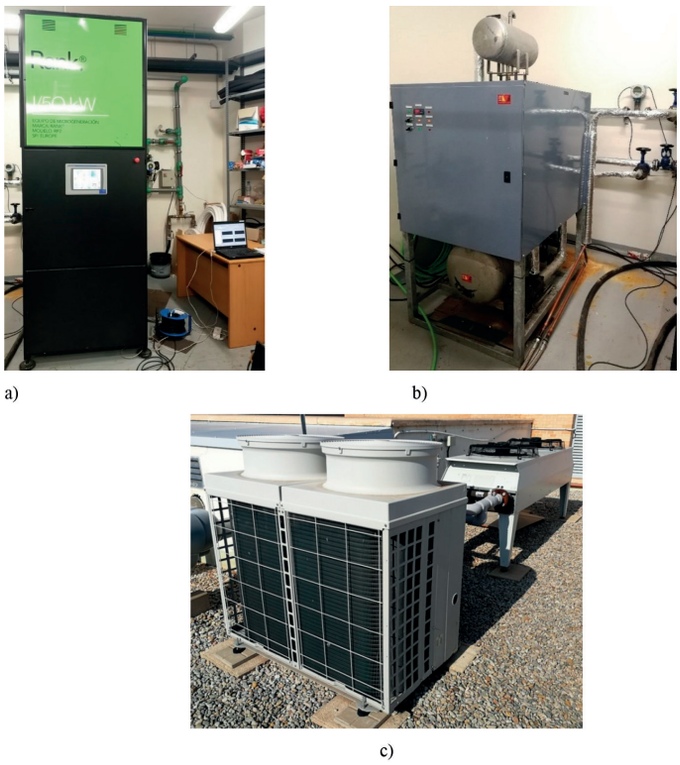
El curso seleccionado para presentar la sesión de laboratorio de ORC es "Gestión energética en plantas industriales", incluido en el segundo semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica. Se compone de 45 horas presenciales de clase y 67.5 horas de trabajo personal (4.5 ECTS, Sistema Europeo de Transferencia y Acumulación de Créditos), y la estructura seguida por esta se muestra en la Fig. A.2.

El objetivo del curso es satisfacer la creciente demanda de soluciones de eficiencia energética en el sector industrial, centrándose en la necesidad de una gestión eficiente de los recursos energéticos. Por lo tanto, este curso está destinado a ofrecer conocimientos técnicos y herramientas para auditar y mejorar la eficiencia energética de diferentes tipos de plantas industriales, así como para implementar medidas de ahorro de energía. Las sesiones de laboratorio tienen el propósito de poner en contacto a los estudiantes con los aspectos prácticos de los conceptos principales vistos en las sesiones de teoría a través de diferentes métodos, como la práctica de laboratorio o la visita a instalaciones reales.

3.2. ESTRUCTURA DE LA SESIÓN DE LABORATORIO

La duración de la sesión de laboratorio es de 2 horas y 30 minutos, se compone de tres partes principales, el número máximo recomendado de estudiantes es de 10 y el profesor debe tener experiencia en sistemas ORC. La sesión comienza con una introducción a la tecnología, su rango de temperaturas y potencia, sus principales aplicaciones y sus principales diferencias en comparación con otras tecnologías de recuperación de calor residual. Luego, se comentan los componentes principales (y las especificaciones típicamente requeridas), arquitecturas y fluidos de trabajo, especificando su efecto sobre el medio ambiente y el cambio climático.

Después de eso, los estudiantes son llevados a laboratorio con el módulo ORC y examinan la posición de los componentes, y el profesor explica la función de otros componentes adicionales necesarios para la seguridad o el funcionamiento correcto. El profesor activa el módulo ORC y se establecen algunas condiciones arbitrarias. Los estudiantes observan la evo-



a) b) c)

Figura 2: a) Módulo ORC comercial, b) caldera y anillo de aceite, y c) enfriadora refrigerada por aire utilizada para la sesión de laboratorio

lución de los parámetros medidos en una pantalla hasta que alcanza condiciones de estado estacionario. Luego, se selecciona otra condición arbitraria, y cuando alcanza un estado estable, comparan los parámetros medidos con la situación anterior para analizar el efecto de las condiciones de entrada en el ORC y la generación de electricidad.

Finalmente, los estudiantes resuelven un problema relacionado con una situación típica, tomando datos de una situación de caso real y discutiendo con el profesor sobre los resultados. Deben entregar al profesor los cálculos realizados y las conclusiones de los resultados a evaluar.

4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La configuración experimental utilizada en la sesión de laboratorio es un módulo ORC comercial de salida de potencia nominal de 1,5 kW basado en una configuración regenerativa y diseñado inicialmente para usarse con el fluido de trabajo HFC-245fa (Fig.2). La aplicación principal del módulo ORC utilizado es el CHP a pequeña escala, y las temperaturas de fuente y disipador de calor corresponden a las de fuentes de calor de baja calidad.

Los componentes principales del módulo ORC son expansores basados en tecnología volumétrica (scroll), intercambiadores de calor de placas soldadas y configuración regenerativa. Las condiciones de funcionamiento están establecidas por dos circuitos secundarios, uno compuesto por una caldera donde un aceite térmico bombeado continuamente se calienta mediante un conjunto de resistencias y simula los desechos o calor renovable útil, y otro que intercambia calor con agua en el condensador a temperaturas más bajas y lleva el calor a un enfriador enfriado por aire. La temperatura máxima de entrada del aceite térmico es de 160 °C y la temperatura máxima de entrada del agua de enfriamiento es de 45 °C.

El módulo ORC cuenta con una serie de sensores para labores de investigación (Tabla 1), y este conjunto de sensores también se usará para mostrar a los estudiantes los parámetros de funcionamiento del fluido de trabajo (temperatura y presión) que determina el estado termodinámico del mismo en cada punto del circuito. El caudal másico del fluido de trabajo y el caudal volumétrico de los fluidos secundarios también se recogen, así como la energía eléctrica generada por el expansor y la consumida por la bomba de refrigerante. Todas las mediciones, reunidas cada segundo, se muestran continuamente en una pantalla, y las mediciones se pueden registrar para su posterior análisis.

Se les pide a los estudiantes que calculen los parámetros que se muestran en la Tabla 2, donde también se pueden mostrar las fórmulas requeridas.

Parámetro medido	Sensor	Incertidumbre
Temperaturas	Termopares tipo K	±0.5 °C
Presiones	Transductores de presión piezoeléctricos	±0.5 kPa
Caudalímetro másico fluido de trabajo	Caudalímetro Coriolis	±0.3%
Potencia eléctrica	Vatímetro digital	±1.55%
Caudalímetro volumétrico aceite térmico	Caudalímetro vortex	±0.028 m³/h
Caudalímetro volumétrico agua	Caudalímetro electromagnético	±0.5%

Tabla 1: Parámetros medidos, instrumentos de medición e incertidumbre asociada

Parámetro	Fórmula	Unidades
Potencia eléctrica de salida neta ($\dot{W}$)	Medido directamente	kW_e
Calor transferido en la fuente de calor ($\dot{Q}_{evap}$)	$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$	kW_{th}
Calor transferido en la disipación ($\dot{Q}_{cond}$)	$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$	kW_{th}
Eficiencia eléctrica (η_{el})	$\eta_{el} = \dot{W} / \dot{Q}_{evap}$	%
Eficiencia térmica (η_{term})	$\eta_{term} = \dot{Q}_{cond} / \dot{Q}_{evap}$	%
Eficiencia global (η_{global})	$\eta_{global} = \eta_{el} + \eta_{term}$	%

Tabla 2: Parámetros calculados en la caracterización del sistema ORC

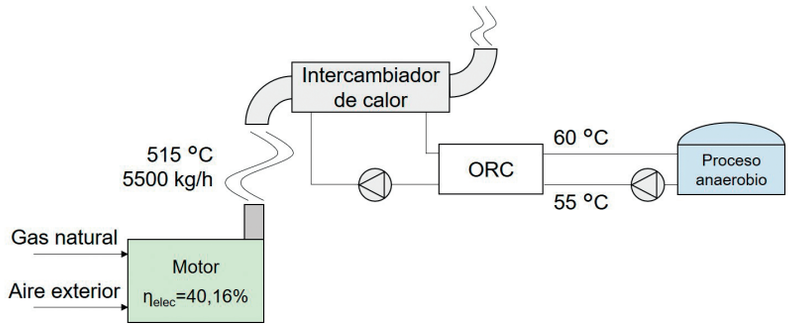
5. CASO DE ESTUDIO

El caso propuesto es la revalorización del calor residual aprovechando los gases de escape de un motor de gas natural instalado en un sistema de cogeneración de una planta de tratamiento de aguas residuales. Las características del motor se dan en la Tabla 3.

La propuesta especifica que el proyecto de recuperación de calor residual incluye un intercambiador de calor de gas / aceite térmico, un circuito de aceite térmico y una máquina ORC (Fig. 3). Además de la electricidad producida por la máquina ORC, también se utilizará el calor intercambiado en el condensador para el proceso de digestión anaeróbica en la planta de tratamiento de aguas residuales, a temperaturas entre 55 y 60 °C, para que el ORC se use para CHP. La producción de electricidad del ORC también es dada por el profesor, como se muestra en la Fig. 3.

Se les pide a los estudiantes que determinen:

- la potencia térmica disponible de los gases de escape del motor de gas natural (522 kW);
- las condiciones de funcionamiento del módulo ORC comercial (transferencia de calor de fuente de calor de 330 kW, temperatura de salida de gas de escape de 303 °C);



Electricidad generada por el ORC (kW)		Temperatura de condensación (°C)		
		65	55	45
Temperatura de evaporación (°C)	210	315	330	No aplica
	200	330	300	285
	190	305	285	265
	180	No aplica	265	245

Figura 3: Esquema y condiciones del proyecto propuesto a los estudiantes

Parámetro	Valor
Eficiencia eléctrica	40.16%
Temperatura de gases de salida	515 °C
Caudal másico de los gases de salida	5500 kg·h^{-1}

Tabla 3: Valores del motor del caso propuesto

- y el período de recuperación de la inversión, considerando que el módulo ORC está operando 8000 horas por año, el coste de inversión es de 100000 € y el precio de la electricidad es de 15 c€ por kWh (beneficio anual de 42000 € y un período de recuperación de 2,38 años).

6. RESULTADOS

Los estudiantes tienen una reacción adecuada a esta sesión completa de laboratorio, y obtuvieron los resultados antes de terminar la sesión. Este hecho fue favorecido debido al grupo reducido y la experiencia del profesor que sabía qué aspectos del módulo ORC deben destacarse durante la sesión de laboratorio. En el cuestionario de opinión final completado por los estudiantes, de 1 (satisfacción más baja) a 5 (satisfacción más alta), los valores promedio para las respuestas se obtuvieron entre 3.6 y 4, lo que resultó en la satisfacción más alta con las habilidades que poseen el profesor y el potencial de aplicación de ORC para detener el cambio climático.

Los estudiantes estaban interesados y se les preguntó acerca de la utilización real de esta nueva tecnología y en qué campo se puede encontrar más comúnmente. Además, preguntaron sobre los problemas típicos de diseño y operación que se ven en las máquinas en funcionamiento, y qué tecnologías son los principales competidores para la generación a pequeña escala de electricidad a partir de desechos o calor renovable.

Esta sesión de laboratorio fue útil para que los estudiantes recordaran principalmente los conceptos vistos en los cursos básicos de termodinámica y transferencia de calor. Además, se combinaron conceptos muy diferentes como estrategias de diseño de intercambiadores de calor, eficiencias del motor, expansión seca, propagación de incertidumbre o viabilidad económica para resolver los problemas propuestos.

7. CONCLUSIONES

Los nuevos desafíos ambientales requieren ingenieros bien preparados, conscientes de las nuevas soluciones disponibles en el mercado. Los cursos de termodinámica aplicada ofrecen una excelente oportunidad para introducir este tipo de tecnologías, como el ORC. Este documento presenta la metodología y los resultados de una sesión de laboratorio ORC diseñada para estudiantes de ingenierías.

Los principios operativos de ORC, las aplicaciones principales, las configuraciones y los fluidos de trabajo han sido expuestos y pueden usarse para el conocimiento básico requerido. Los mismos conceptos deben transmitirse a los estudiantes antes de comenzar la parte práctica de la sesión. El ORC utilizado en esta sesión es un módulo comercial en el que se han probado fluidos de trabajo nuevos y ecológicos. La presencia de este módulo ofrece una solución rápida y económica para la sesión de laboratorio. Los estudiantes han realizado una prueba real y han observado cuáles son los principales parámetros utilizados para controlar su funcionamiento. A partir de eso, han calculado algunos parámetros de energía relevantes para caracterizar el módulo ORC. Finalmente, a partir de un caso propuesto que utiliza datos de una aplicación real (calor residual disponible en los gases de escape de un motor de cogeneración), los estudiantes seleccionaron una solución ORC y calcularon la viabilidad económica de la misma.

La satisfacción de los estudiantes ha sido destacable, y la aplicación de este tipo de prácticas se recomienda para cursos avanzados de diferentes tipos de ingeniería o máster. Si no hay un módulo ORC disponible en la universidad, se pueden recuperar datos experimentales de la literatura, o se puede construir un sistema micro ORC.

REFERENCIAS

[1] Ahlström P, Aim K, Dohrn R, Elliott JR, Jackson G, Jaubert JN, et al. A survey of the role of thermodynamics and transport properties in ChE university education in Europe and the USA. Chem Eng Educ 2010.
[2] European University Association. Energy Transition and the Future of Energy Research, Innovation and Education: An Action Agenda for European Universities. Brussels, Belgium: 2017.
[3] Pantaleo AM, Ciliberti P, Camporeale S, Shah N. Thermo-economic Assessment of Small Scale Biomass CHP: Steam Turbines vs ORC in Different Energy Demand Segments. Energy Procedia, 2015. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.381.
[4] Belman-Flores JM, Barroso-Maldonado JM, Mendez-Díaz S, Martínez-Martínez S. Virtual test bench as a complement to study thermal area: Application in vapor compression systems. Rev Fac Ing 2015. https://doi.org/10.17533/udea.redin.n77a08.
[5] Kandpal TC, Broman L. Renewable energy education: A global status review. Renew Sustain Energy Rev 2014. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.039.
[6] Bornasal F, Brown S, Perova-Mello N, Beddoes K. Conceptual Growth in Engineering Practice. J Eng Educ 2018;107:318–48. https://doi.org/10.1002/jee.20196.
[7] Meyer D, Wong C, Engel F, Krumdieck S. Design and Build of a 1 kilowatt Organic Rankine Cycle Power Generator. 35th New Zeal Geotherm Work 2013 Proc 2013.
[8] Bonk CD, Laux C, Rödder M, Neef M. Design of a 1 KW Organic Rankine Cycle for Teaching and Research Issues. Energy Procedia, 2017. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.117.
[9] Imran M, Haglind F, Asim M, Zeb Alvi J. Recent research trends in organic Rankine cycle technology: A bibliometric approach. Renew Sustain Energy Rev 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.028.
[10] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden MO. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program 2018. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18434/T4JS3C.

AGRADECIMIENTOS

La Universitat Jaume I ha financiado esta investigación a través del "Apoyo a la innovación educativa para el año académico 2017/18" (3411), "Ayudas complementarias para proyectos de innovación educativa de nuevos grupos para el año académico 2017/18" (3411/17). Adrián Mota-Babiloni desea agradecer el apoyo financiero del Gobierno español en virtud de las "Ayudas Juan de la Cierva-Formación 2016" (referencia FJCI-2016-28324).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9211-1.pdf