

NUEVO FLUIDO ORGÁNICO PARA APLICACIONES DE CICLOS DE POTENCIA RANKINE ORGÁNICOS CON FUENTES DE CALOR SENSIBLES

NEW ORGANIC FLUID TO RANKINE POWER CYCLE APPLICATIONS WITH SENSITIVE HEAT SOURCES

Dr. Eng. Carlos J. Noriega Sanchez*, Dr. Eng. Nelson Afanador García
MSc. Gustavo Guerrero Gomez *****

***. *** Universidad Francisco de Paula Santander**, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en tecnología y desarrollo en ingeniería (GITYD).
Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
Tel. +57-7- 5690088 Ext. 221.

**** Universidad Francisco de Paula Santander**, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (GIIC).
Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
Tel. +57-7- 5690088 Ext. 218.
E-mail: {cjnioregas, gguerrerog, nafanadorg}@dominio.edu.co.

Resumen: Invertir en el estudio de procesos de generación de potencia que conduzcan a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y permitan el aumento de la eficiencia energética, al aprovechar al máximo las fuentes de energía disponibles, es una estrategia fundamental para mitigar el impacto antrópico en el calentamiento global. Con esto en mente, en el presente trabajo se desarrolla un análisis detallado del uso de un nuevo fluido orgánico de tipo mezcla constituido por CO₂ (dióxido de carbono) y un hidrofluorocarbono HFC-161 en un ciclo de potencia Rankine movido por una fuente de calor sensible de baja temperatura (150°C). Los análisis preliminares permitieron identificar el impacto de la mezcla sobre la eficiencia y potencia del ciclo, así como, aspectos benéficos de este nuevo fluido de trabajo para generación de potencia a partir de un parámetro de mérito normalizado de carácter ambiental.

Palabras clave: Dióxido de carbono, hidrofluorocarbono, ciclo Rankine orgánico, calor residual.

Abstract: Invest in the study of power generation processes that lead to the reduction of greenhouse gases emissions and allow the increase of energy efficiency, maximizing the use of available sources, is a fundamental strategy to mitigate the anthropic impact on global warming. With this in mind, this paper develops a detailed analysis about the use of a new organic fluid of mixture type consisting by CO₂ (carbon dioxide) and HFC-161 hydrofluorocarbon, in a Rankine power cycle using a sensitive heat source of low temperature (150 ° C). Preliminary analyzes allowed to identify the mixture impact on the efficiency and liquid power of the cycle, as well as, beneficial aspects of this new working fluid from a normalize merit parameter of environmental nature in power cycles.

Keywords: Carbon dioxide, hydrofluorocarbon, organic Rankine cycle, waste heat.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la población mundial y el consumo de energía están en constante crecimiento (Chang et al.,

2012). Sin embargo, las reservas de energía fósil, que se utilizan principalmente para actividades humanas, están disminuyendo. Además, la generación de energía a partir de combustibles

fósiles causa muchos problemas ambientales, como el calentamiento global, la contaminación del aire y la lluvia ácida. En este escenario, uno de los sectores que más consume energía es la industria. Hasta el 2015, este sector representaba aproximadamente el 29.9% del consumo mundial de energía (IEA, 2016). Por otro lado, los estudios estadísticos indican que el 50% o más de la energía total utilizada en los procesos industriales se desecha posteriormente como calor residual de baja temperatura (Johnson et al., 2008).

A pesar de que el calor residual de baja temperatura tiene un potencial energético reducido y un valor económico más bajo que el de alta temperatura, esta fuente de calor es muy abundante (Johnson et al., 2008). Sin embargo, debido a la falta de métodos de recuperación eficientes, la industria generalmente ha desechado el calor residual de baja calidad y se ha convertido en una preocupación ambiental debido a la contaminación térmica. Por lo tanto, estrategias centradas en aprovechar o convertir este calor en electricidad están despertando mucho interés (Hussam et al., 2018). Esto no solo mejora la eficiencia energética de los procesos industriales, sino que también reduce la contaminación térmica causada por la liberación directa de este calor al medio ambiente.

Los sistemas que utilizan el calor residual para generar electricidad a menudo usan este calor para generar vapor y luego mover una turbina. Sin embargo, el ciclo de potencia de vapor se vuelve menos rentable a bajas temperaturas ($< 340\text{ }^{\circ}\text{C}$), ya que el vapor a baja presión requiere equipos más grandes (Ennio y Marco, 2017). En contraste, para aprovechar la energía disponible en estos niveles, se propuso el Ciclo Rankine Orgánico (ORC, del inglés: *Organic Rankine Cycle*) (Ennio y Marco, 2017; Sánchez y da Silva, 2018).

La particularidad del ORC sobre el tradicional ciclo Rankine de vapor se basa en el fluido de trabajo. En ORC, se usa un fluido orgánico en lugar de agua (Bertrand et al., 2011; Noriega et al., 2018). Este componente es típicamente un refrigerante, un hidrocarburo o un aceite de silicona, entre otros. En comparación con el agua, estos fluidos se destacan por tener una temperatura de ebullición más baja y, como tal, tienen el potencial de recuperar calor en niveles de temperatura más bajos que los que se encuentran en los ciclos Rankine de vapor.

Aunque la tecnología ORC está bien establecida, desafíos relacionados con la prospección de nuevos fluidos de trabajo que puedan superar las

limitaciones técnicas y de seguridad y, simultáneamente minimicen las inversiones iniciales sigue siendo el propósito de muchos grupos de investigación a nivel mundial (Lasala et al., 2014). En muchos casos, la tendencia de los nuevos fluidos de trabajo para ORC fue impuesta por la industria de la refrigeración, dado que los fluidos de trabajo adecuados para ciclos de refrigeración también se han considerado fluidos de trabajo en ciclos de potencia de tipo orgánico o inorgánico. Sin embargo, muchos fluidos refrigerantes, considerados excelentes fluidos de trabajo en esta clase de sistemas, se han eliminado gradualmente porque presentan impactos negativos al ambiente (Sarbu, 2014).

En las últimas décadas, la industria de la refrigeración ha vuelto a mostrar su interés por los refrigerantes de tipo natural, particularmente por el dióxido de carbono (CO_2) (Lorentzen y Pettersen, 1993; Pearson, 2005). Este fluido tiene muchas ventajas medioambientales y de seguridad, así como propiedades termodinámicas diferenciadas. Debido a estos atributos, el CO_2 últimamente se ha considerado un fluido capaz de cumplir con los requisitos de la nueva generación de fluidos de trabajo para ciclos de potencia. Sin embargo, su baja temperatura crítica ($30.98\text{ }^{\circ}\text{C}$) impone restricciones en el proceso de condensación cuando se usa en ciclos Rankine, ya que requiere que la temperatura del fluido de enfriamiento (aire o agua) sea muy baja ($< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), que es una limitación para las regiones tropicales. Por otro lado, elevadas presiones de operación del CO_2 en tales ciclos (6-16 MPa) presuponen un desafío a la hora del proyecto del sistema.

En vista de lo anterior, las mezclas de fluidos orgánicos, especialmente con CO_2 , surgen como una alternativa mediante la cual nuevos fluidos de trabajo para ORC pueden ser contemplados. En ese contexto, el presente trabajo presenta un análisis del desempeño termodinámico a partir de la primera y segunda ley de la termodinámica así como de aspectos ambientales, de un fluido orgánico tipo mezcla zeotrópica constituido por CO_2 y un HidroFluoroCarbono HFC-161, indicadores que favorecen significativamente este fluido de trabajo para ciclos de potencia orgánicos que operan con fuentes de baja temperatura.

2. METODOLOGIA

El estudio aquí propuesto se basa en la recuperación de energía de fuentes de calor sensible de baja

temperatura en la que, los gases de combustión, como la forma más común de calor residual, se consideran como la fuente de calor. El análisis termodinámico del ciclo de potencia se describe a partir de los balances de energía y exergía en los diferentes componentes del ciclo y finalmente, el potencial de calentamiento global (GWP, del inglés: *Global Warming Potential*) es el parámetro ambiental considerado a fin de evaluar el impacto ambiental del fluido de trabajo en el ciclo de potencia, siendo que, el valor de GWP de la mezcla es determinado por el promedio ponderado del GWP de los componentes puros en función de su fracción de masa, como lo sugieren Andreasen et al., 2014.

Una forma plausible de estimular el interés, así como la posible implementación de sistemas de recuperación de calor residual, es diseñar ciclos que aprovechen el potencial de este residuo sin que demanden alta complejidad, ya sea mediante la mezcla (número de componentes) o la configuración del ciclo, ya que inevitablemente tendrían un impacto directo en el costo de la instalación. Por esta razón, únicamente la configuración del ciclo básico Rankine (CBR) fue contemplada en los análisis del presente trabajo (ver Figura 1).

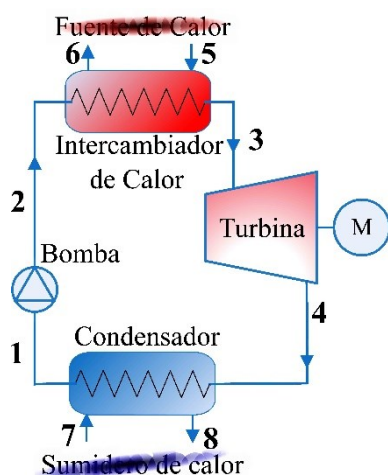


Fig. 1. Configuración básica de un ciclo Rankine de potencia.

En la configuración del CRB, el fluido de trabajo opera entre dos niveles de presión: baja presión, donde ocurre la fase de condensación; y la alta presión, en la cual ocurre el proceso de recuperación de calor de la fuente. Por ser una fuente de calor de tipo sensible, únicamente condiciones de operación transcíticas fueron evaluadas. En la condición transcítica, el proceso de adición de calor (puntos 2-3 de la Figura 1) ocurre a una presión superior a la

presión crítica del fluido de trabajo y por tanto, el fluido no presenta un cambio de fase. Posteriormente, la mezcla a elevada presión y temperatura se expande en la turbina produciendo trabajo mecánico (entre los puntos 3 y 4), y continúa con el proceso de condensación (entre los puntos 4 y 1). A diferencia de un fluido de trabajo puro, las mezclas zeotrópicas presentan un cambio de fase con temperatura variable, diferencia de temperatura conocida como temperatura de *glide* (Andreasen et al., 2014). Después del proceso de condensación, la mezcla alcanza la condición de líquido saturado y vuelve a la bomba para comenzar nuevamente el ciclo. Un diagrama T-s del CRB es ilustrado en la Figura 2.

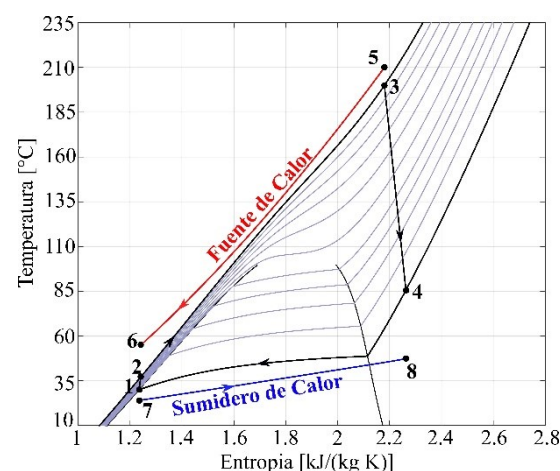


Fig. 2. Diagrama T-s para una mezcla zeotrópica de CO₂/HFC-161.

2.1 Parámetros de desempeño del CRB

Convencionalmente, la eficiencia de la primera ley de las máquinas térmicas (η_I) se usa comúnmente como un indicador del rendimiento termodinámico de un ciclo de potencia. Este parámetro es definido como:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_e}, \quad (1)$$

Donde \dot{W}_{liq} es la potencia neta producida por el ciclo y \dot{Q}_e es la tasa de calor recibida por el fluido de trabajo durante el proceso de transferencia de calor en la fase de alta presión.

La eficiencia de la segunda ley de la termodinámica, se utiliza para medir el rendimiento del sistema con respecto a la condición reversible a partir de:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{E}_{Max}}, \quad (2)$$

Donde \dot{E}_{Max} es la exergía o potencial máximo de energía de la fuente de calor, que viene dada por,

$$\dot{E}_{Max} = \dot{m}_f \left[(h_{f,en} - h_0) - T_0 (s_{f,en} - s_0) \right], \quad (3)$$

Donde \dot{m}_f es el flujo de masa de los gases de combustión, $h_{f,en}$ y $s_{f,en}$ son la entalpía y entropía específica a la condición de entrada de la fuente de calor (1 kg s^{-1} , $550.77 \text{ kJ kg}^{-1}$ y $4.2380 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), respectivamente. El subíndice "0" en la Ecuación (3) indica el valor de la propiedad en el estado de referencia ($T=25^\circ\text{C}$ y $P=100 \text{ kPa}$). Otros valores usados en la simulación fueron: i) eficiencia isentrópica de la bomba 85%, ii) eficiencia isentrópica de turbina 65%, iii) temperatura del punto de burbuja de la mezcla (punto 1 en la figura 1) 30°C , *pinch point* en el condensador e intercambiador de calor de alta presión (entre los puntos 2 y 3 en la Figura 1) 5°C y fue asumida una diferencia de temperaturas entre los gases de combustión y la temperatura de entrada a la turbina de $\Delta T_{5-3} = 10^\circ\text{C}$.

2.2 Parámetros de operación normalizados

El uso de parámetros de operación normalizadas se debe al hecho de que éstas, a diferencia de las consideradas individualmente – que generalmente tienen tendencias bien establecidas – dependen mucho de los parámetros operacionales evaluados con respecto a la ocurrencia de valores óptimos, lo que permite explorar más fácilmente los beneficios de las mezclas en la configuración del ciclo considerada en el presente trabajo.

2.1 Validación computacional del modelo de ORC

Con el fin de validar la implementación computacional del modelo de ciclo orgánico, así como los balances de masa y energía del ciclo, una validación numérica fue efectuada a partir de datos publicados en la literatura de ciclos de potencia. En ese sentido, el trabajo de You-Rong et al., 2014 fue tomado como referencia. Para ello, una mezcla de R600A (Isobutano) y HFC-245fa con una fracción en masa de 0.3 y 0.7, respectivamente, fue considerada. Los resultados son mostrados en la Figura 3 en función de la eficiencia de la primera ley de la termodinámica (η_I) y la temperatura de entrada en el intercambiador de calor entre los

puntos 2 - 3 de la Figura 2. Como puede ser apreciado, las diferencias entre el presente modelo y el de You-Rong et al., 2014 son pequeñas, siendo que la máxima variación fue del 1.3% y como tal, el modelo se considera adecuado. Es importante destacar que las propiedades termodinámicas fueron tomadas del REFPROP 9.1 (NIST, 2013) y que el código computacional fue implementado en Matlab® (MathWorks, 2017).

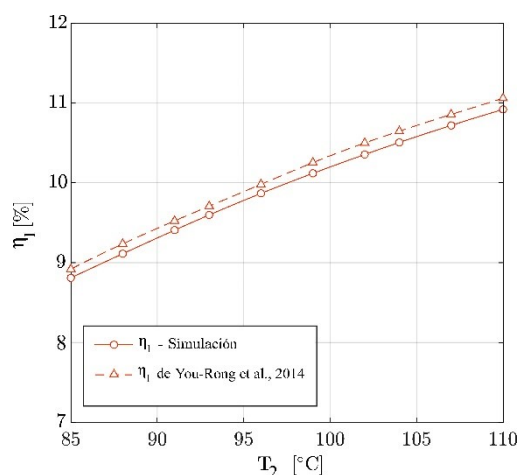


Fig. 3. Comparación de η_I del modelo computacional implementado en el presente estudio y del trabajo de You-Rong et al., 2014.

3. RESULTADO Y DISCUSIONES

La Figura 4 muestra los resultados de potencia neta (\dot{W}_{liq}) y de eficiencia térmica de primera ley de la termodinámica (η_I) obtenidos en función de la temperatura de entrada de la turbina. La mezcla de $\text{CO}_2/\text{HFC-161}$ con una fracción de masa de CO_2 de 50% se tomó como referencia para este análisis. Es evidente que tanto η_I como \dot{W}_{liq} aumentan a medida que aumenta la temperatura de ingreso del fluido de trabajo del ciclo a la turbina, sin embargo, esta temperatura está limitada por la temperatura de degradación térmica de la mezcla (Ennio y Marco, 2017). De la figura, se evidencia que para cada nivel de temperatura de entrada de la turbina, tanto η_I como \dot{W}_{liq} alcanzan un óptimo con respecto a la presión alta del sistema. La existencia de un punto óptimo para estos parámetros de desempeño se debe a los diferentes efectos que sobre la potencia producida por la turbina y consumida por la bomba ejerce la presión de alta. Aunque ambas potencias aumentan al aumentar la presión, aquella producida por la turbina presenta un aumento significativo en valores bajos de presión y tiende a estabilizarse a

valores altos de esta; el que consume la bomba tiene el comportamiento opuesto. Por lo tanto, se espera la existencia de un punto óptimo tanto para la potencia cuanto para la eficiencia.

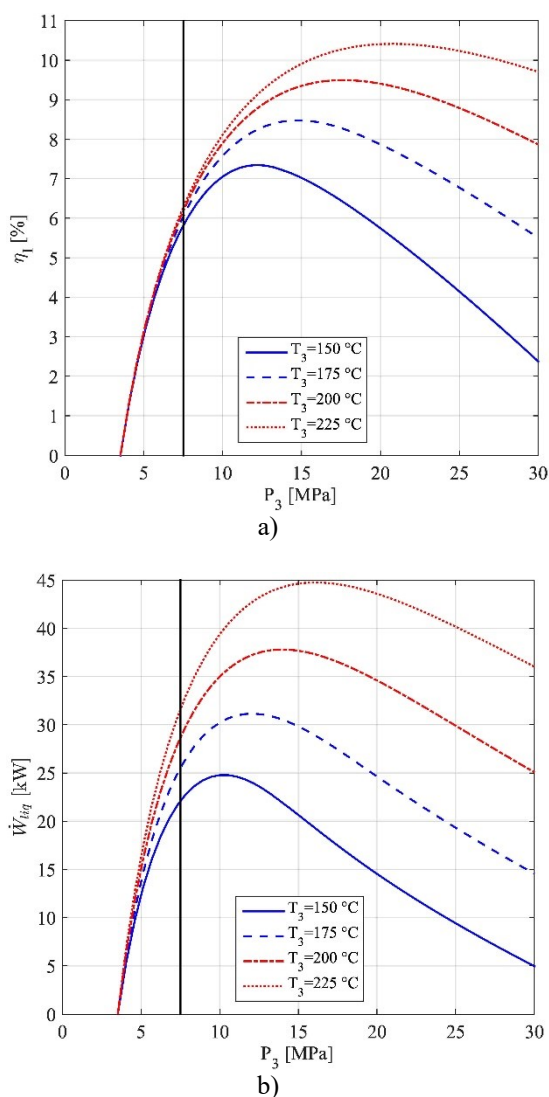


Fig. 4. Influencia de la presión de alta (P_3) sobre a) η_l y b) \dot{W}_{liq} , con una mezcla de $\text{CO}_2/\text{HFC-161}$ y diferentes temperaturas de entrada de la turbina.

La línea vertical en la Figura 4 indica la presión crítica de la mezcla a la concentración dada. Por lo tanto, en las condiciones supuestas, los ciclos termodinámicos para esta mezcla de refrigerantes exhiben un mejor rendimiento cuando operan en condiciones transcíticas, ya que tanto las presiones como las temperaturas óptimas encontradas son más altas que las críticas de mezcla.

También se evaluó el impacto de la fracción de CO_2 sobre los parámetros de desempeño del sistema. En

este sentido, los resultados mostrados en la Figura 5 indican que a medida que la fracción de CO_2 se aproxima de 0% y 100%, los valores de η_l y \dot{W}_{liq} se aproximan a los obtenidos si se usan HFC-161 y CO_2 puros, respectivamente.

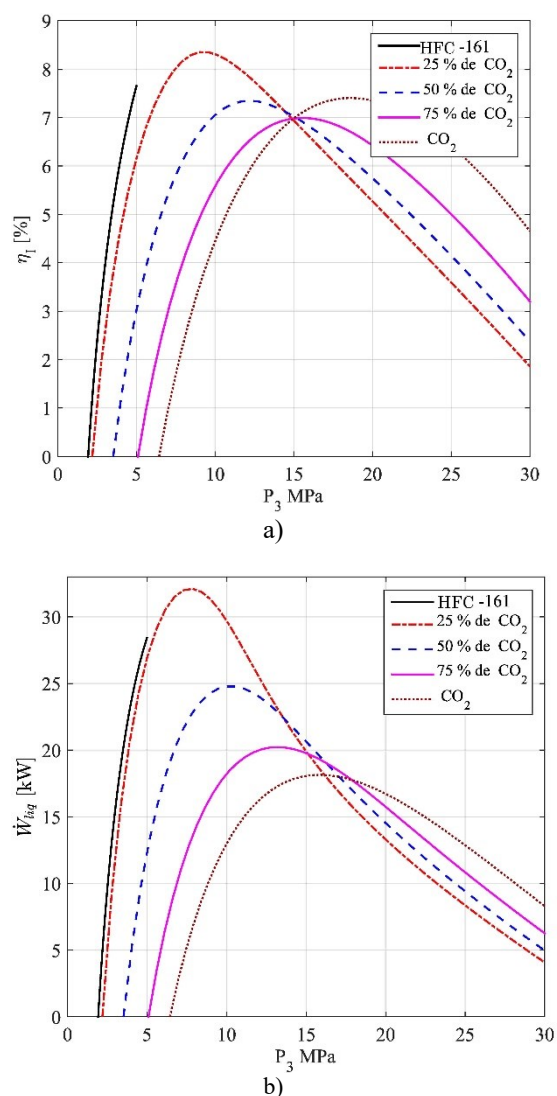


Fig. 5. Influencia de la fracción en masa de CO_2 sobre η_l y \dot{W}_{liq} con una mezcla de $\text{CO}_2/\text{HFC-161}$ en función de la presión de entrada a la turbina.

Los resultados concuerdan con los esperados, evidenciando la fidelidad de la simulación. Las curvas de η_l y \dot{W}_{liq} para HFC-161 se interrumpen cuando la presión de alta alcanza los 5 MPa, ya que este valor representa la presión máxima permitida en la correlación para este refrigerante. Por el contrario, las mezclas de este componente con CO_2 permiten

una mayor flexibilidad en niveles de presión mas altos, de hecho, una mezcla con una fracción en masa del 25% en CO_2 presento los valores más elevados de η_I y \dot{W}_{liq} . Asi mismo, la presencia de CO_2 en la mezcla disminuye la inflamabilidad del HFC-161 (Ennio y Marco, 2017) y, por lo tanto, permite el uso en el ciclo de potencia de sus atributos favorables con respecto a los parámetros de rendimiento del HFC-161 puro, pero en condiciones de seguridad más favorables para el sistema.

La Figura 6 presenta los valores de eficiencia de segunda ley (η_{II}) del ciclo obtenidos con la mezcla de $\text{CO}_2/\text{HFC161}$. Se puede observar que este fluido de trabajo presenta un potencial máximo de aprovechamiento del recurso energético disponible de la fuente de calor del 35%, es decir, teóricamente existe aún un 75% de energía que es subutilizada en el proceso debido a las irreversibilidades inherentes al proceso de trasferencia de energía en el intercambiador de calor de alta temperatura y en el condensador, sin embargo, estos valores son habituales para esta clase de ciclo y fuente de calor (Ennio y Marco, 2017).

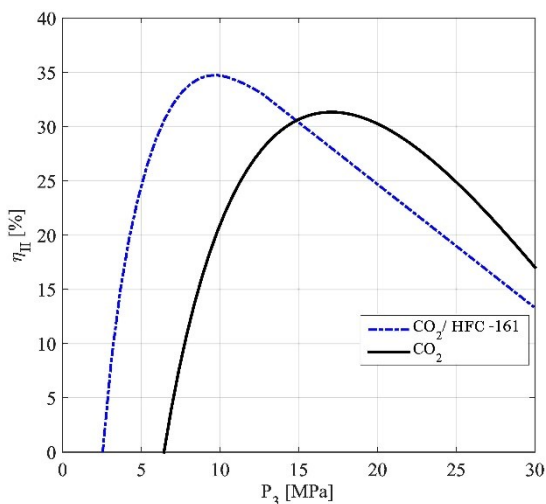


Fig. 6. Valores de η_{II} de la mezcla de $\text{CO}_2/\text{HFC-161}$ y CO_2 puro para una temperatura de entrada a la turbina de 150 °C.

3.1 Parámetro de desempeño ambiental en ciclos de potencia

Los análisis realizados en esta sección se concluyen considerando una discusión sobre la evaluación de un nuevo parámetro de tipo ambiental en ciclos Rankine orgánicos asociados al fluido de trabajo del sistema. En este contexto, los parámetros de rendimiento del ciclo, por ejemplo, eficiencia y

potencia, se consideran esta vez normalizados por el GWP de la mezcla, de forma que representen una nueva figura de mérito que pueda auxiliar en la selección de un fluido de trabajo más adecuado para el sistema teniéndose como referencia su impacto al ambiente.

Los indicadores ambientales juegan un papel relevante como herramienta de análisis, mediante el cual el potencial de las mezclas de CO_2 en aplicaciones de producción de potencia puede ser demostrado. En la literatura, dos aspectos ambientales asociados con el fluido de trabajo se exaltan con frecuencia, su valor de GWP y su límite de inflamabilidad. Sin embargo, otros aspectos ambientales como los riesgos para la salud, los riesgos físicos y los asociados con los residuos (o desechos) térmicos también podrían incluirse en esta categoría. Ciertamente, al relacionar estos indicadores con los parámetros tradicionales de rendimiento de los ciclos de potencia, podrían constituir una importante figura de mérito que facilita la identificación de una curva de *trade-off* entre los fluidos de trabajo en ciclos de potencia usando como referencia sus constituyentes puros.

En este sentido, un análisis hecho a partir del HFC-161 puro y sus mezclas, es delineado para demostrar la aplicabilidad de este enfoque. En este contexto, considerando el GWP de la mezcla como uno de los parámetros ambientales, la eficiencia de la primera ley y la potencia neta del ciclo ponderados sobre este parámetro es evaluado. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 7, donde se observa que a medida que aumenta la fracción de CO_2 en la mezcla, esta se vuelve más interesante en cuanto aspectos ambientales, ya que su potencial de calentamiento global disminuye conforme la fracción de CO_2 aumenta. Por lo tanto, estos parámetros de rendimiento del ciclo ponderados por GWP muestran cuán indeseable ambientalmente es el HFC-161, mientras que su mezcla con CO_2 se vuelve mucho más atractiva para el sistema, a partir de este aspecto.

4. CONCLUSIONES

El estudio propuesto en este documento se basa en la necesidad de desarrollar conocimiento en ingeniería de ciclos de potencia de tipo orgánico con nuevos fluidos de trabajo, particularmente con aquellos que tienen atributos amigables con el medio ambiente y que ofrezcan alternativas viables para evitar algunas desventajas encontradas con el uso de fluidos puros. De forma global, los resultados

obtenidos con el fluido orgánico de tipo mezcla constituido por $\text{CO}_2/\text{HFC-161}$ indican que:

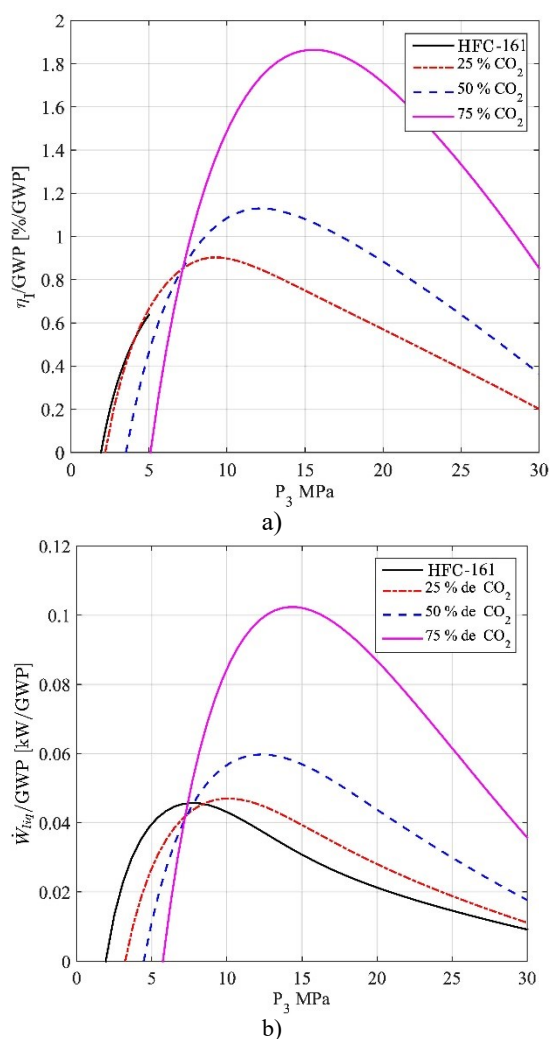


Fig. 7. Variación de η_1/GWP y $\dot{W}_{\text{liq}}/\text{GWP}$ para diferentes presiones de entrada de la turbina con HFC-161 puro y sus mezclas con CO_2 con fracción de masa de 25, 50 y 75% de CO_2 .

- Es posible aprovechar el potencial energético en fuentes de baja temperatura ($<150^\circ\text{C}$) con fluidos de este tipo considerándose una temperatura de condensación próxima a la temperatura crítica del CO_2 y con niveles de presión aceptables, los cuales no comprometen las seguridad del ciclo de potencia.
- Los ciclos termodinámicos para esta clase de mezclas de refrigerantes exhiben un mejor rendimiento cuando operan en condiciones transcriticals, ya que tanto las presiones como las temperaturas óptimas encontradas son más altas que las críticas de la mezcla.

Aunque el GWP es uno de los mayores indicadores de impacto ambiental, este parámetro se limita prácticamente al uso y eliminación de un determinado fluido de trabajo, no afectando directamente el ahorro de energía proveniente del ciclo termodinámico. A su vez, la eficiencia del ciclo a menudo se reduce cuando se consideran mezclas como el fluido de trabajo, sin embargo, su uso puede estar justificado como consecuencia de su uso y descarte, aunque haya una reducción en la eficiencia del ciclo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la fuente de energía térmica en el ciclo de generación de potencia proviene de un residuo térmico, lo que garantiza que no se realicen quemaduras adicionales de combustible para alimentar la reducción de la eficiencia del ciclo. Por lo tanto, los beneficios del uso de residuos térmicos también deben incorporarse en esta categoría de análisis para subsidiar el uso de mezclas. Delante de eso, otros indicadores de impacto ambiental podrían considerarse como parámetros o indicadores de mérito, enriqueciendo así las discusiones de estos análisis. Dichos indicadores incluyen la eficiencia de recuperación de calor de los desechos térmicos y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

REFERENCIAS

- Andreasen J. G., Larsen U., Knudsen T., Pierobon L. y Haglind F. (2014) *Selection and optimization of pure and mixed working fluids for low grade heat utilization using organic Rankine cycles*, Energy, **Vol. 73**, pp. 204-213.
- Bertrand F. T., Lambrinos Gr., Frangoudakis A. y Papadakis G. (2011) *Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **Vol. 15**, pp. 3963-3979.
- Chang Y., Lee J. y Yoon H. (2012). *Alternative projection of the world energy consumption-in comparison with the 2010 international energy outlook*. Energy Policy, **Vol. 50**, pp. 154–160.
- Ennio M. y Marco A. N. (2017) *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems Technologies and Applications*. Editorial Elsevier Science.
- Hussam J., Navid K., Sulaiman A., Bertrand D., Amisha Ch. y Savvas A. Tassou. (2018) *Waste heat recovery technologies and applications*, Thermal Science and Engineering Progress, **Vol. 6**, pp. 268-289.
- Lasala S., Chiesa P., Di Bona D. y Consonni S. (2014) *Vapour – Liquid Equilibrium Measurements of CO_2 based Mixtures*:

- Experimental Apparatus and Testing Procedures*, Energy Procedia, **Vol. 45**, pp. 1215-1224.
- Lorentzen G. y Petterssen J. (1993) *A new efficient and environmentally bening system for car air conditioning*. International Journal of Thermal Sciences, **Vol. 16**, pp. 4–12.
- MathWorks (2017) Available: <https://www.mathworks.com/help/gads/gamultioobj.html>.
- NIST. (2013) REFPROP Version 9.1. Available in: <https://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>.
- Noriega S. Carlos J., Gosselin L. y K. da Silva A. (2018) *Designed binary mixtures for subcritical organic Rankine cycles based on multiobjective optimization*, Energy Conversion and Management, **Vol. 156**, pp. 585-596.
- Pearson A. (2005) *Carbon dioxide - new uses for an old refrigerant*. International Journal of Refrigeration, **Vol. 28**, pp. 1140–1148.
- Sánchez N. Carlos J. y K. da Silva Alexandre. (2018) *Technical and environmental analysis of transcritical Rankine cycles operating with numerous CO₂ mixtures*, Energy, **Vol. 142**, pp. 180 -190.
- Sarbu I. (2014) *A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems*. International Journal of Refrigeration, **Vol. 46**, pp. 123–141.
- You-Rong Li, Mei-Tang Du, Chun-Mei Wu, Shuang-Ying Wu y Chao L. (2014) *Potential of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures as working fluids for waste heat recovery*, Energy, **Vol. 77**, pp. 509-519.

SITIOS WEB

- IEA. (2016). Key world energy statistics. <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/kwan1/docs/KeyWorld2016.pdf>.
(Consultado: 02 de Agosto 2019)
- Johnson I., Choate W. T. y Davidson A. (2008) Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1218716>.
(Consultado: 28 de Julio 2019)