

## **SÍNTESIS DE UN CICLO RANKINE ORGÁNICO PARA LA RECUPERACIÓN DEL CALOR RESIDUAL EN UNA TORRE DE DESTILACIÓN DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITES VEGETALES USADOS (AVUS)**

**María Fernanda Laborde**, CONICET, TECSE, Fac. Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), [fernanda.laborde@fio.unicen.edu.ar](mailto:fernanda.laborde@fio.unicen.edu.ar)

**Medardo Serna-González**, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, México, [mserna@umich.mx](mailto:mserna@umich.mx)

**José María Ponce-Ortega**, UMSNH, [jmponce@umich.mx](mailto:jmponce@umich.mx)

**Ana María Pagano**, TECSE, Fac. Ingeniería - UNICEN, [apagano@fio.unicen.edu.ar](mailto:apagano@fio.unicen.edu.ar)

**María Cristina Gely**, TECSE, Fac. Ingeniería - UNICEN, [cgely@fio.unicen.edu.ar](mailto:cgely@fio.unicen.edu.ar)

**Resumen**— En un proceso de destilación a baja temperatura, técnicamente es factible realizar una integración energética para lograr un uso racional de la energía utilizando una bomba de calor. Sin embargo, en procesos que emplean altas temperaturas ( $>40^{\circ}\text{C}$ ) presentan problemas operativos y de desgaste del equipo. También pueden presentarse problemas con el fluido refrigerante, en virtud de su baja estabilidad y de su susceptibilidad a disociarse a temperaturas de compresión elevadas. En este trabajo se sintetizó un Ciclo Rankine Orgánico, para aprovechar el calor residual del condensador de la torre de destilación de purificación del biodiesel y transformarlo en potencia y energía calórica que puede ser aprovechada para calentar la materia prima. El proceso de producción de biodiesel a partir de AVUs se simuló en software Aspen Plus<sup>®</sup>, este consta de una etapa de esterificación ácida seguida de otra de transesterificación alcalina. Se empleó el refrigerante R123 por su rango de temperatura de operación y por ser amigable con el medioambiente, logrando una eficiencia neta del ciclo del 17% y una generación de calor de 51 kJ/s.

**Palabras clave**— *optimización energética, ciclo rankine, biodiesel, esterificación, transesterificación catalítica, aceites vegetales usados, ORC, R123.*

### **1. Introducción**

Hoy en día la energía es uno de los recursos más importantes y, al mismo tiempo, una de las mayores preocupaciones en todo el mundo debido al rápido agotamiento de los combustibles no renovables, al calentamiento global y el cambio climático.

El Ciclo Rankine Orgánico (ORC) se puede usar para lograr la conversión de calor en energía eléctrica [1]. El calor a diferentes niveles de temperatura puede estar disponible como calor geotérmico, calor de biomasa, calor solar o como calor residual. Si bien los

procesos de ORC ya se conocen desde hace tiempo, actualmente ganan un interés cada vez mayor [2, 3].

La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados (AVUs) es una opción atractiva para producir biodiesel económicamente en la mayoría de los países del mundo [4-6]. El precio de los AVUs es relativamente más barato en comparación con los aceites vegetales frescos [7, 8].

Los ácidos grasos libres (AGL) en aceites usados son un serio obstáculo para el proceso de transesterificación, por lo cual se hace imprescindible someterlos a un pretratamiento de esterificación [6, 9, 10].

Desde el año 2002, en Argentina se han desarrollado distintas experiencias sobre la producción de biodiesel a partir de AVUs [11]. Actualmente Argentina es productora del 7% del biodiesel mundial [12].

En el año 2006 se sancionó en el Congreso de la Nación la Ley N° 26093 que regula y promueve la producción y uso sustentable de biodiesel. Esta ley establece que todo combustible líquido caracterizado como gasoil o diesel oil que se comercializa dentro del territorio nacional, debe ser mezclado con biodiesel, en un porcentaje del 5% como mínimo a partir del año 2010. La tasa de corte en Argentina es de 8,4% [12].

En el diseño y evaluación de procesos, programas computacionales tales como Aspen Plus<sup>®</sup> y Aspen Hysys<sup>®</sup> constituyen valiosas herramientas que proporcionan un entorno de simulación apto para optimizar distintas alternativas tecnológicas del proceso [13]. Software como EES (Engineering Equation Solver) [14] proporcionan una base de datos termodinámicos de alta precisión para cientos de sustancias, tales como los refrigerantes.

En un proceso de destilación a baja temperatura técnicamente es factible realizar una integración energética para lograr un uso racional de la energía utilizando una bomba de calor que tome calor a baja temperatura de los vapores de salida de la torre, para luego entregarlo en el re-hervidor de la columna a mayor temperatura. Sin embargo, en procesos que emplean altas temperaturas, como el caso de la torre de destilación en la cual se lleva a cabo la purificación del biodiesel, el compresor de las bombas de calor convencionales debería operar con una elevada relación de compresión provocando una temperatura de salida del compresor elevada con consecuentes problemas operativos y de desgaste del equipo. Por lo que, el objetivo de este trabajo es sintetizar un ORC utilizando el calor residual del condensador de la torre de destilación del proceso de transesterificación de AVUs para generar potencia y energía aprovechable en el proceso.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1 Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel a partir de AVUs**

En la Figura 1 se presenta el proceso de producción de Biodiesel a partir de AVUs simulado en Aspen Plus<sup>®</sup> [13]. En este modelo de simulación se sintetizó el pretratamiento de AVUs (esterificación) y la producción del biodiesel por medio de la reacción de transesterificación [10].

En la TORRE-2 (Figura 1) se realiza la purificación del biodiesel; dicha torre consta de 4 platos y una relación de reflujo de 2 [15]. Las temperaturas de operación son de 193°C

y 262°C, para el condensador y el re-hervidor, respectivamente, generando en el condensador un calor residual QL de 64,12 kJ/s. Estos datos fueron obtenidos mediante el modelo de simulación.

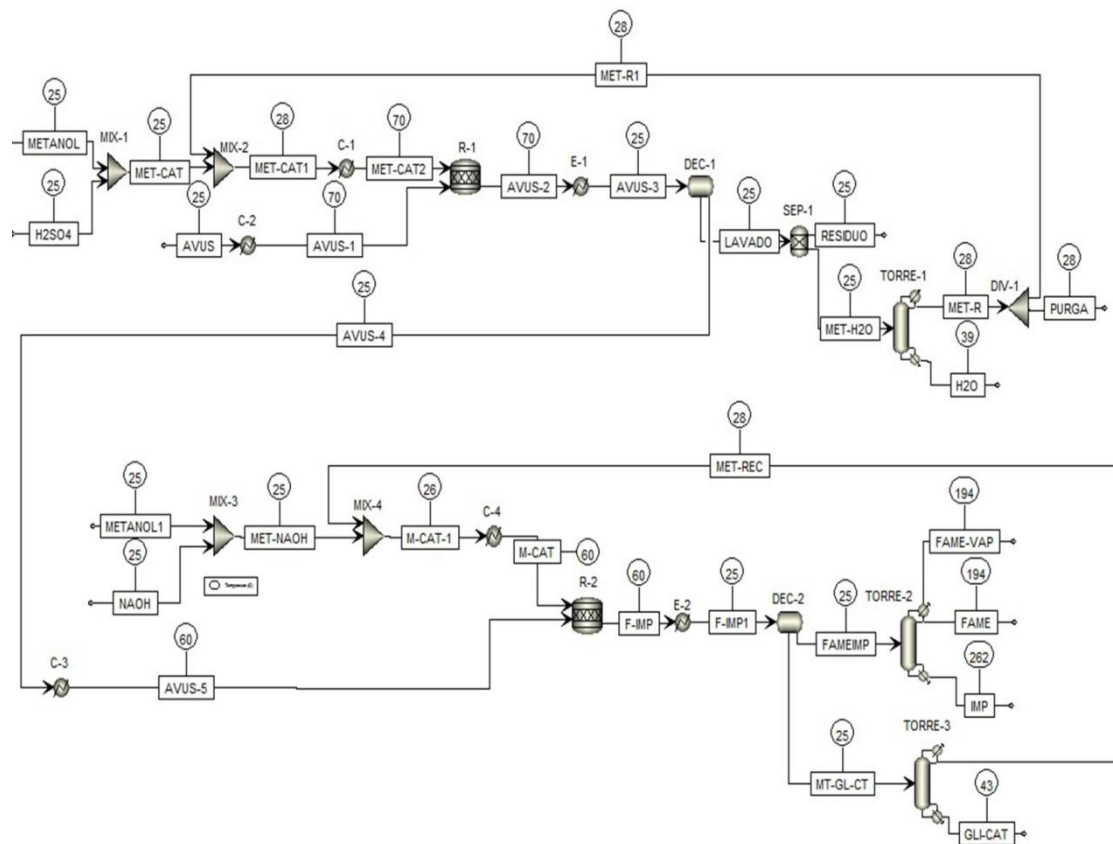


Figura 1. Proceso de obtención de Biosiesel a partir de AVUs.  
(R-1: Reacción de Esterificación, R-2: Transesterificación)  
Fuente: elaboración propia en Aspen Plus®.

## 2.2 Selección del Fluido de Trabajo para el ORC

La selección del fluido de trabajo para su uso en ORC es un aspecto crucial porque, dependiendo de la aplicación, la fuente y el nivel de calor a utilizar, el fluido debe tener propiedades termodinámicas óptimas a las temperaturas y presiones más bajas posibles y también satisfacer varios criterios (económico, no tóxico, no inflamable y amigable con el medio ambiente) permitiendo un alto uso de la energía disponible de la fuente de calor [1, 16, 17].

El daño de los refrigerantes se mide en base de dos valores:

- ✓ Su potencial para dañar la capa de ozono (ODP)
- ✓ Su potencial para calentar el planeta (GWP).

El ODP es medido con base en el potencial de daño del refrigerante R-11, de manera tal que un refrigerante con ODP de 0,5 daña la mitad de lo que daña el R-11 la capa de ozono. El GWP indica el efecto ambiental ocasionado producto de una fuga de 1 kg de dicho refrigerante al ambiente, comparado con el efecto causado por 1 kg de CO<sub>2</sub> (R-744) en el calentamiento del planeta [20].

### 2.3 Síntesis del ORC

En la etapa de purificación del biodiesel es posible realizar la síntesis de ORC, utilizando el calor residual aportado por el condensador de la TORRE-2 (Figura 1).

El principio de funcionamiento de ORC es el mismo que el del ciclo Rankine convencional, pero en este caso el fluido de trabajo es un compuesto orgánico de bajo punto de ebullición en lugar de agua (R718), disminuyendo así la temperatura necesaria en la evaporación. En una bomba (P-100) se presuriza el fluido líquido a entropía constante, que se inyecta en un evaporador (E-100) para producir vapor a presión constante, que luego se expande isentrópicamente en una turbina (K-101) conectada a un generador, y finalmente, el vapor de salida es condensado en el condensador (E-101) a presión constante y aspirado por la bomba para comenzar el ciclo nuevamente [16] (Figura 2).

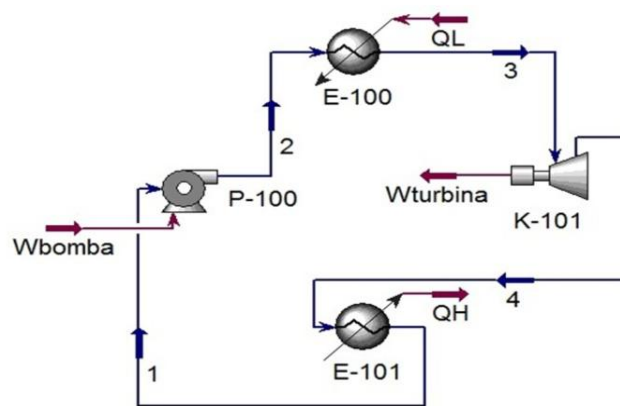


Figura 2. Ciclo Rankine Orgánico.  
Fuente: elaboración propia en Aspen Hysys®.

Las ecuaciones (1) a (4) corresponden a las ecuaciones de diseño del ORC [21, 22].

$$Q_L = m * \Delta H \quad (1)$$

$$Q_H = m * \Delta H \quad (2)$$

$$W_{bomba} = m * v * \Delta P \quad (3)$$

$$W_{turbina} = m * \Delta H \quad (4)$$

donde:  $Q_L$  : Calor que ingresa al evaporador del ORC

$Q_H$  : Calor que libera el condensador del ORC

$W_{bomba}$ : Potencia que requiere la bomba

$W_{turbina}$ : Potencia generada por el ORC

$\Delta H$  : Diferencia de entalpía

$\Delta P$ : Diferencia de presión

$v$ : Volumen específico.

$m$ : Flujo másico del refrigerador.

La eficiencia energética total del ciclo ( $\eta$ ) está dada por la ecuación (5).

$$\eta = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_L} \quad (5)$$

### 3. Resultados y Discusión

En este trabajo se sintetiza el ORC a partir del calor residual del condensador de la torre de destilación (TORRE-2) del proceso de transesterificación de AVUs a fin de generar potencia y aprovechar el calor generado para calentar la materia prima en el calentador C-3 de 25°C a 60°C (Figura 1).

Se seleccionó el refrigerante R123 (2,2-Dicloro-1,1,1-trifluoroetano); éste es aplicable al rango de temperatura de operación del condensador de la torre (193°C). Presenta punto crítico a  $T=183.7$  y  $P=3668$  kPa. Tiene un ODP de 0,01 y GWP de 120[20].

Para diseñar el ORC se considera  $\Delta T$  mínimo = 15°C. Mediante el diagrama T-S (Figura3) a partir de las temperaturas de operación del ORC, las cuales son 178°C para el evaporador y 75°C para el condensador se hallaron las presiones de trabajo las cuales son 3400 kPa y 420 kPa, respectivamente. A partir del diagrama P-H (Figura4) del refrigerante se determinaron las entalpías de los puntos de operación  $H1=H2= 280$  kJ/kg,  $H3=475$ kJ/kg y  $H4=440$  kJ/kg.

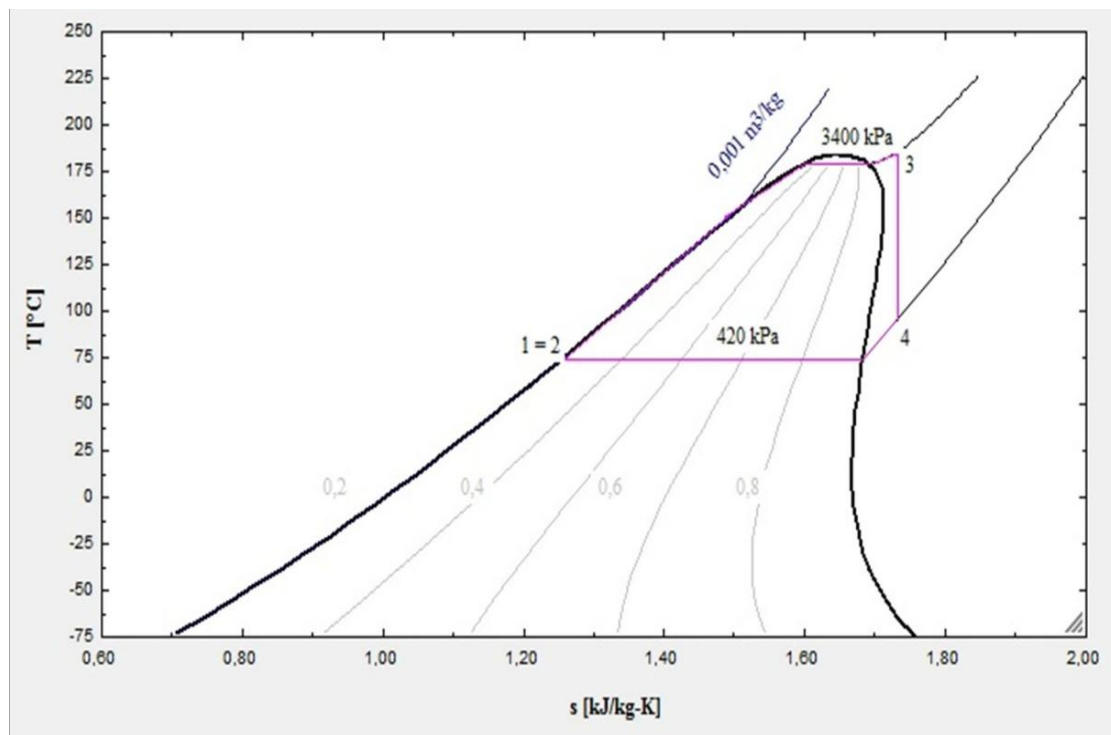


Figura 3. Diagrama T-S de R123.  
Fuente: elaboración propia con EES.

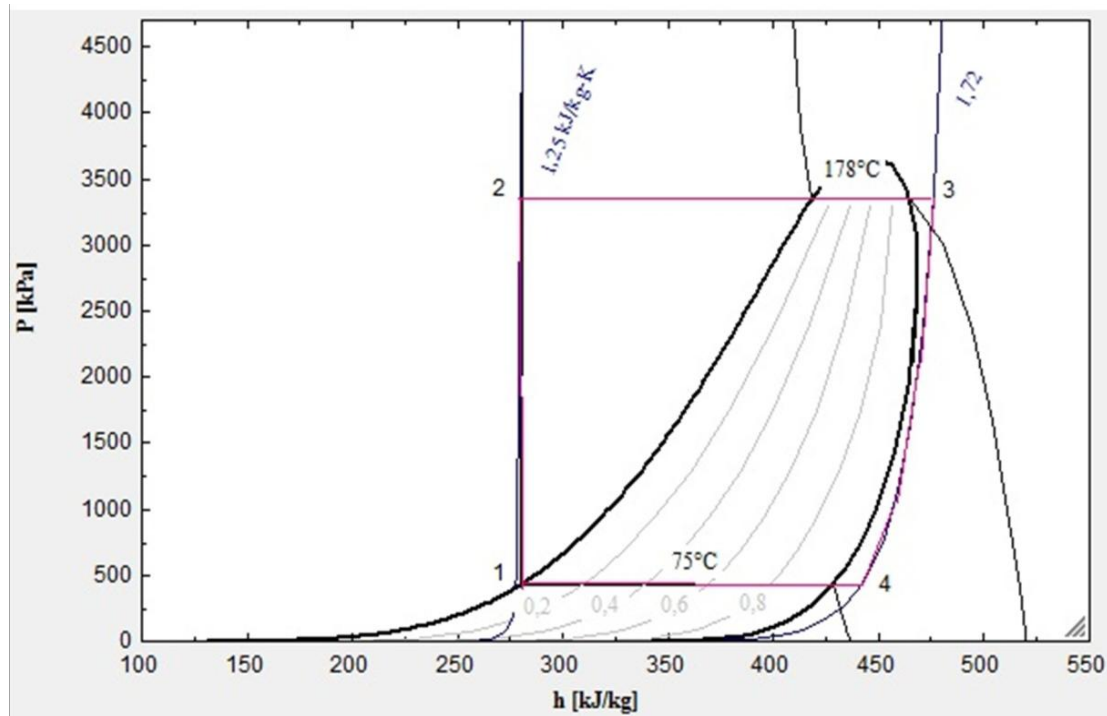


Figura4. Diagrama P-H de R123.  
Fuente: elaboración propia con EES.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros calculados con las ecuaciones (1-5). El valor de QL se obtuvo a partir de la simulación del proceso en Aspen Plus® resultando ser de 64,12 kJ/s.

Tabla 1. Parámetros ORC.

m	0,32 kg/s
Wturbina	12,16 kJ/s
Wbomba	0,95 kJ/s
QH	51,2 kJ/s
$\eta$	17%

Fuente: elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos en la Tabla 1, es posible observar que se logra una adecuada eficiencia del ciclogenerando calor, QH, y potencia, Wturbina. Trabajos futuros tenderán a la mejora de esta eficiencia a partir del análisis de diferentes alternativas estructurales y refrigerantes.

Por otra parte, cabe mencionar que fue posible realizar una disminución del uso de servicio externo de calentamiento para la materia prima debido a que el calor producido por el ORC es superior al necesario.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se estudió una configuración de un Ciclo Rankine Orgánico, para aprovechar el calor residual del condensador de la torre de destilación donde se lleva a

cabo la purificación del biodiesel y transformarlo en potencia y energía calórica, que puede ser aprovechada para calentar la materia prima del proceso. Se empleó como refrigerante el R123 con un ODP de 0,01 y GWP de 120 logrando una eficiencia neta del ciclo de 17% con una generación de calor de 51 kJ/s y una potencia de 12,16kJ/s.

Con el objetivo de reducir el consumo de fuentes de energía primarias se podrán a futuro investigar diseños alternativos tales como los ORC regenerativos y recuperativos tendiendo de esta forma a la optimización del ORC. Trabajos futuros también incluirán el análisis de las eficiencias producidas a partir de la utilización de diferentes refrigerantes.

## 5. Referencias

- [1] LIRA-BARRAGÁN, L.F.; PONCE-ORTEGA, J.M.; SERNA-GONZÁLEZ, M.; EL-HALWAGI, M.M. (2014). Optimal design of process energy systems integrating sustainable considerations. *Energy*. v.76, p.139-160.
- [2] VESCOVO, R.; SPAGNOLI, E. (2017). *High Temperature ORC Systems*. Energy Procedia. v.129, n., p.82-89.
- [3] BRAIMAKIS, K.; KARELLAS, S. (2018). Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. *Energy Conversion and Management*. v.159, p.353-370.
- [4] WANG, L.; DONG, X.; JIANG, H.; LI, G.; ZHANG, M. (2014). Preparation of a novel carbon-based solid acid from cassava stillage residue and its use for the esterification of free fatty acids in waste cooking oil. *Bioresource Technology*. v.158, p.392-395.
- [5] BANERJEE, A.; CHAKRABORTY, R. (2009). Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review. *Resources, Conservation and Recycling*. v.53, n.9, p.490-497.
- [6] SAHAR, SADAF, S.; IQBAL, J.; ULLAH, I.; BHATTI, H.N.; NOUREN, S.; HABIB UR, R.; NISAR, J.; IQBAL, M. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*.
- [7] BABAZADEH, R.; RAZMI, J.; PISHVAEE, M.S.; RABBANI, M. (2017). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega*. v.66, Part B, p.258-277.
- [8] DEMIRBAS, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. v.50, n.1, p.14-34.
- [9] TALEBIAN-KIAKALAIIEH, A.; AMIN, N.A.S.; MAZAHARI, H. (2013). A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*. v.104, p.683-710.
- [10] LABORDE, M.F.; SERNA-GONZÁLEZ, M.; PONCE-ORTEGA, J.M.; PAGANO, A.M.; GELY, M.C. (2018). Optimización Energética aplicada al Proceso de Producción de Biodiesel a partir de Aceites Vegetales Usados, in *CLICAP 2018: Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, Editor Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria de la Universidad Nacional de Cuyo.
- [11] GARRIDO, S.M. (2010). Tecnología, territorio y sociedad. Producción de biodiesel a partir de aceites usados. *Revista de Ciencias Sociales*. n., p.75-86.
- [12] NAYLOR, R.L.; HIGGINS, M.M. (2018). The rise in global biodiesel production: Implications for food security. *Global Food Security*. v.16, p.75-84.

- [13] ASPENTECH (2018). <http://www.aspentech.com>. n.
- [14] EES (Engineering Equation Solver) <http://www.fchart.com/ees/>. 2018. DOI: <http://www.fchart.com/ees/>.
- [15] ZHANG, Y.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*. v.89, n.1, p.1-16.
- [16] VÉLEZ, F.; SEGOVIA, J.J.; MARTÍN, M.C.; ANTOLÍN, G.; CHEJNE, F.; QUIJANO, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.16, n.6, p.4175-4189.
- [17] LAI, N.A.; WENDLAND, M.; FISCHER, J. (2011). Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles. *Energy*. v.36, n.1, p.199-211.
- [18] NOWAK, W.; BORSUKIEWICZ-GOZDUR, A.; STACHEL, A.A. (2008). Using the low-temperature Clausius–Rankine cycle to cool technical equipment. *Applied Energy*. v.85, n.7, p.582-588.
- [19] ILLUECA, C. El ciclo de Rankine orgánico y sus aplicaciones en la recuperación de calor. 2015.
- [20] QUIROGA, A. (2013). Análisis y optimización de un ciclo rankine orgánico basado en energía solar empleando diferentes fluidos de trabajo.
- [21] CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. (2012). Termodinámica. Séptima Edición ed, ed. M.G. Hill.
- [22] VÉLEZ, F.; SEGOVIA, J.J.; MARTÍN, M.C.; ANTOLÍN, G.; CHEJNE, F.; QUIJANO, A. (2012). Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature. *Fuel Processing Technology*. v.103, p.71-77.