

Evaluación tecnoeconómica de un Ciclo Rankine Orgánico para el aprovechamiento de energía térmica residual

Loo Chong, Ana Cristina

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, República de Panamá
ana.loo1@utp.ac.pa - ORCID 0009-0002-2524-2463

López, Guillermo

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Republica de Panamá
guillermo.lopez2@utp.ac.pa – ORCID 0009-0007-8218-9474

Chen, Jorge

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Republica de Panamá
jorge.chen2@utp.ac.pa – ORCID 009-0000-8703-3974

Abstract

This study assesses the technical and economic feasibility of implementing an Organic Rankine Cycle (ORC) in a cement plant in Panama to recover waste heat generated in clinker production kilns, with the objective of promoting more sustainable energy alternatives within the cement industry. The methodology is based on a comprehensive literature review and simulations performed using the Termograf V5.7 software, where the cycle was evaluated with three working fluids: ammonia, isopentane, and R22. The analysis considered thermal efficiency and net power output as key performance indicators. The results indicate that R22 achieved the highest thermal efficiency (10.6%), followed by ammonia (10.2%) and isopentane (9.6%). Consequently, ammonia is regarded as the most balanced option in terms of efficiency and environmental impact. The findings demonstrate that the project is technically and environmentally feasible; however, from an economic standpoint, it is not viable in the short or medium term.

Keywords: Feasibility, Organic Rankine Cycle, Waste heat, Waste thermal energy.

Resumen

Este estudio busca evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un ORC en una planta cementera en Panamá, para recuperar la energía térmica residual generada en

los hornos de producción de Clinker, buscando alternativas energéticas más sostenibles en el sector cementero. La metodología se basa revisiones bibliográficas y simulaciones con el software Termograf V5.7, en donde se evalúa el ciclo con tres fluidos, el amoníaco, isopentano y R22, evaluando la eficiencia térmica y la potencia neta obtenida. Se tiene como resultado que el fluido con mayor eficiencia es el R22 (10.6%), el amoniaco de 10.2% y por último el isopentano de 9.6%, por lo cual se considera que el amoniaco es la opción más equilibrada en términos de eficiencia e impacto ambiental. Se concluye con esta investigación que es un proyecto técnica y ambientalmente viable, pero desde el enfoque económico no es viable a corto y mediano plazo.

Palabras claves: Calor residual, Ciclo Rankine Orgánico, Energía térmica residual, Viabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI y Panamá no escapa de esa realidad, siendo un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. El aumento en la temperatura global se encuentra en un promedio de hasta 1.5 °C, considerando regiones en donde el incremento puede ser mayor o menor [1].

Las plantas cementeras tienen un alto consumo energético, el cual se le puede atribuir el 11% de la energía eléctrica total consumida por el sector industrial y de cierto modo esto contribuye al uso de los combustibles fósiles [2] [3]; de los procesos dentro de las cementeras podemos destacar la producción del Clinker en donde se utiliza hornos a altas temperaturas, el cual puede generar energías térmicas residuales de 190°C hasta 350°C [4], si estas no son aprovechadas son emitidas a la atmosfera y contribuyen al calentamiento global generando una problemática de contaminación ambiental.

Se propone implementar un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) para generar energía eléctrica aprovechando la energía térmica residual, como solución a esta problemática, en donde se analiza el ORC con tres fluidos de trabajo (amoníaco, isopentano y R22), buscando evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar esta tecnología.

En ese sentido, el aprovechamiento de la energía térmica residual industrial es una alternativa que puede contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta energía, que de otro modo se desperdiciaría, proviene de procesos industriales que se pueden reutilizar para generar electricidad, calentar espacios o producir vapor [5].

2. MÉTODO

A. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica nos proporciona un panorama actualizado sobre la implementación de un ORC, permitiendo conocer las ventajas y desventajas de esta tecnología, así como también nos proporciona información sobre las variables de interés como lo son la temperatura de la energía térmica residual, las presiones de operaciones y las condiciones generales del ORC para su estudio.

B. Escenarios analizados

Para el análisis se considera que los gases de escape tienen una composición similar al aire con un flujo másico de gases de 110 kg/s [6], con una temperatura a la entrada del evaporador de 190 °C y a la salida con un rango de temperatura de 160°C a 120°C disminuyendo 10°C en cada simulación.

C. Consideraciones para el análisis de la bomba, turbina, evaporador y condensador

Para el análisis de la bomba y turbina se simularon bajo la suposición de un proceso isentropico (proceso ideal) y se ajusta para una eficiencia isentrópica de bomba 75% y turbina del 80%; para el evaporador se consideró un pinch point de 5°C, para proporciona un equilibrio entre la eficiencia del ciclo y las limitaciones prácticas de diseño y se establece una presión de 20 bar, considerando que se tiene un proceso de adición de calor a presión constante en el evaporador [7] , en cuanto al análisis del condensador, se establece que la temperatura debe ser igual o superior a la temperatura ambiente y la presión debe ser mayor a la atmosférica, esto para garantizar una transferencia de calor efectiva y permite que la turbina opere con contrapresión [6].

D. Escogencia del fluido de trabajo

Para la selección del fluido de trabajo del ORC, se realiza una comparativa entre el amoniaco, isopentano y R22, buscando el fluido más optimo en términos de eficiencia térmica, seguridad e impacto ambiental; cabe señalar que se escoge estos fluidos buscando alternativas que tengan características técnicas similares al R22, pero con menor impacto ambiental [8], [9], Es importante destacar que los tres fluidos escogidos se encuentran dentro de la biblioteca del software Termograf V 5.7, por lo cual no tendremos limitaciones en cuanto al análisis de estos.

E. Análisis del ahorro económico y el tiempo de retorno de inversión

El cálculo del ahorro económico anual se realizó en base a la potencia neta obtenida multiplicado por la Tarifa con Demanda Máxima (ATD) de B/.0.1310 publicada por la ASEP para el primer semestre de 2025. En referencia a la energía térmica residual se considera una disponibilidad del 90% [10] y el costo de la planta de ORC es estimado a base de B/. 2000.00 por cada kW de potencia que produzca y en el análisis del TRI no se consideran los costos de operación o mantenimiento, solamente se contemplan el costo de inversión inicial.

3. RESULTADOS

A. Eficiencia térmica del ORC.

Se puede observar la eficiencia obtenida en el ORC con el amoníaco, en donde se logra una eficiencia térmica del 10.2% para el ciclo con una eficiencia isentropica de bomba de 75% y de turbina del 80%. La eficiencia lograda en comparación a los estudios de Benites (2010), en donde simulan con condiciones similares se logra una eficiencia del 9.53%, validando que los resultados obtenidos están dentro del rango esperado [11].

Los resultados del análisis para el isopnetano presentados muestran una eficiencia térmica del 9.5%, es importante señalar que la eficiencia térmica obtenida con el uso de isopentano no alcanzó los valores esperados. Teóricamente, se preveía un mejor desempeño en comparación con el amoníaco, con una eficiencia superior al 13 % [12]. Una posible explicación para este comportamiento puede ser que el rango de presiones empleado en la simulación, teniendo una diferencia de presión de 15 bar entre la presión máxima y mínima no fue el óptimo para la operación del isopentano. Este fluido de trabajo presenta un mejor rendimiento en ciclos con diferencias de presión más moderadas; fuera de dicho margen, su eficiencia térmica tiende a disminuir [13].

Para el R22, en donde se logra una eficiencia térmica del 10.6%, logrando una eficiencia mayor del amoníaco y el isopentano, esto es debido al bajo punto de ebullición del R22, que permite evaporarse a temperaturas relativamente bajas sin necesidad de aplicar un sobrecalentamiento significativo.

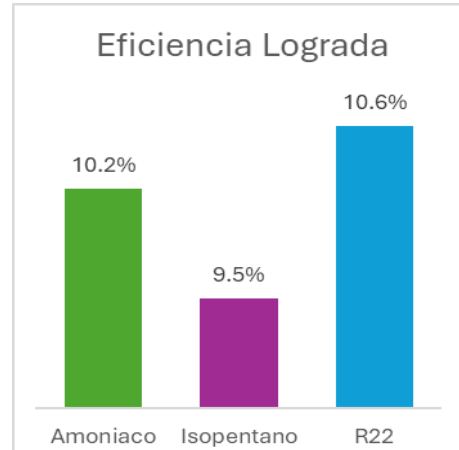


Figura 1. Eficiencia térmica lograda por cada fluido

En la tabla 1, podemos observar que la cantidad de energía térmica transferida en un intercambiador de calor depende directamente de la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el fluido de trabajo y a medida que la tasa de calor aumenta, se observa un aumento en el flujo másico, esto es un comportamiento esperado debido a la Ley de la Conservación de la Energía; al aumentar la tasa de calor que se transfiere en el evaporador, el flujo másico debe aumentar para absorber y transportar la energía disponible.

Tabla 1. Relación entre el flujo de calor de cada escenario y el flujo masico de cada fluido

| Escenario a Diferentes Temperaturas °C | Flujo de Calor (kW) | Amoniac | | Isopentano | | R22 | |
|--|---------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| | | Flujo másico del amoniac (kg/s) | Potencia neta (kW) | Flujo másico del isopentano (kg/s) | Potencia neta (kW) | Flujo másico del R22 (kg/s) | Potencia neta (kW) |
| 160°C | 2420 | 1,9059 | 248,166 | 6,1015 | 229,286 | 11,1729 | 256,01 |
| 150°C | 3630 | 2,8589 | 371,6 | 9,1523 | 343,938 | 16,7594 | 384,017 |
| 140°C | 4840 | 3,8118 | 495,034 | 12,2031 | 458,576 | 22,3459 | 512,023 |
| 130°C | 6050 | 4,7648 | 618,467 | 15,2539 | 573,221 | 27,9323 | 640,027 |
| 120°C | 7260 | 5,7178 | 743,2 | 18,3046 | 687,862 | 33,5188 | 768,033 |

El ahorro económico obtenido oscila entre B/. 33,481.08 y B/. 100,443.45 dependiendo del escenario analizando, en la tabla 2, se puede visualizar el ahorro que se puede obtener para cada fluido analizado, así como también el tiempo de retorno de inversión que es de 19.63 años. El escenario más favorable encontrado fue para el R22, con una temperatura a la salida del evaporador, sin embargo es importante señalar que los ahorros obtenidos para el amoniac se asemejan bastante a los del R22, posicionando el amoniac en el fluido más equilibrado en cuando a términos de técnicos, económicos y ambientales.

Tabla 2. Análisis económico y el tiempo de retorno de inversión

| Escenario a Diferentes Temperaturas °C | Ahorro económico anual en dólares con amoniaco | Ahorro económico en dólares anual con isopentano | Ahorro económico anual en dólares con R22 | Tiempo de retorno de inversión (años) |
|--|--|--|---|---------------------------------------|
| 160 | 31906,65 | 30333,33 | 33481,08 | 19,63 |
| 150 | 47776,39 | 45501,22 | 50221,68 | 19,63 |
| 140 | 63646,24 | 60667,08 | 66962,37 | 19,63 |
| 130 | 79515,98 | 75834,05 | 83702,76 | 19,63 |
| 120 | 95552,79 | 91000,41 | 100443,45 | 19,63 |

4. CONCLUSIONES

El aprovechamiento de la energía térmica residual de los procesos de las plantas cementeras en una Ciclo Rankine orgánico con los tres fluidos analizados es técnicamente viable, pero en términos económicos no es viables ya que el tiempo de retornos de inversión es muy elevada. Desde una perspectiva ambiental, si se considera como un proyecto viable, ya que se contribuiría con la diversificación de la matriz energética reduciendo el consumo de los combustibles fósiles, siendo una alternativa más sostenible a los ciclos de generación de potencia tradicionales.

De los fluidos analizados se obtuvo que el R22, logro una eficiencia térmica de 10.6% frente al 10.2% del amoniaco y 9.5% del isopentano, demostrando que es el fluido con mayor eficiencia, sin embargo su uso conlleva grandes restricciones por su alto impacto ambiental, pese a que el isopentano es el fluido más óptimo técnicamente, su baja eficiencia es baja en las condiciones de operación del ORC no se considera viables, siendo el amoniaco el fluido más equilibrado en cuando a términos de eficiencia y sostenibilidad, siempre y cuando se cumplan con las normas de seguridad requeridas para el amoniaco.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente, "Efectos del Cambio Climático en Panamá," Mi Ambiente. Consultado: el 20 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dcc.miambiente.gob.pa/cambio-climatico-en-panama/>
- [2] C. Aristizabal and J. González, "Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial," Revista UIS Ingenierías, vol. 20, no. 3, May 2021, doi: 10.18273/revuin.v20n3-2021006.
- [3] Kunak, "Impacto ambiental de la industria cementera, poniendo en valor la monitorización," Feb.

- 21, 2022. Consultado: el 23 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera/>
- [4] Cemex, “Tipos de Cementos,” CEMEX LATAM Holdings. Consultado: el 23 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cemexmexico.com/productos/cemento>
- [5] Atlas Copco, “¿Qué es el calor residual en los procesos industriales?,” Atlas Copco. Consultado: el 23 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <http://atlascopco.com/es-mx/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-waste-heat>
- [6] L. Serrat A., “Recuperación de calores residuales en una cementera mediante ciclo de Rankine orgánico,” Universidad Pontificia Comillas, Madrid - España, 2023. Consultado: 25 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://files.griddo.comillas.edu/tfm-lorenzo-serrat-2022-23.pdf>
- [7] F. Cardeño, L. J. Gallego, and L. A. Rios, “Refinación de la Fase Glicerina del Biodiesel de Aceite de Palma empleando Ácidos Minerales,” *Información tecnológica*, vol. 22, no. 6, pp. 15–24, 2011, doi: 10.4067/S0718-07642011000600003.
- [8] M. Bianchi et al., “Performance and total warming impact assessment of pure fluids and mixtures replacing HFCs in micro-ORC energy systems,” *Appl Therm Eng*, vol. 203, p. 117888, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117888.
- [9] X. Tao, M. P. Nuijten, and C. A. Infante F., “Two-phase vertical downward flow in plate heat exchangers: Flow patterns and condensation mechanisms,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 85, pp. 489–510, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.008.
- [10] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, “Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168–186, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [11] A. de J. Benítez Fundora, “Comportamiento Termodinámico de un ORC operando con varias sustancias para el aprovechamiento de Fuentes Térmicas de Bajo Potencial,” 2010. Consultado: el 25 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5074388.pdf>
- [12] M. E. Barbosa, “Análisis del Ciclo de Rankine Orgánico Ideal mediante 8 Fluidos Orgánicos de Trabajo,” 2019. Consultado: el 30 de enero del 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/22049f4f-2bb2-45ae-a3b6-9f8018d00118/content>
- [13] L. Wang and Z. Zhuang, “Thermodynamic analysis and optimization of organic Rankine cycles using isopentane as working fluid,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2020. DOI:10.1016/j.energy.2012.11.009

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.